

/10/-

Die Mechanik

der Gehörknöchelchen

und

des Trommelfells

von

H. Helmholtz.

Mit 12 Holzschnitten.

(Separatabdruck aus Pflüger's Archiv für Physiologie I Jahrgang.)

Bonn 1869.

Verlag von Max Cohen & Sohn.



Die Mechanik

der Gehörknöchelchen

und

des Trommelfells

von

H. Helmholtz.

Mit 12 Holzschnitten.

(Separatabdruck aus Pflüger's Archiv für Physiologie I Jahrgang.)

Bonn 1869.

Verlag von Max Cohen & Sohn.


WELLCOME
HISTORICAL
MEDICAL
LIBRARY

Die Mechanik der Gehörknöchelchen und des Trommelfells.

Von

H. Helmholtz.

Eine kürzlich in der Zeitschrift für rationelle Medicin veröffentlichte Notiz aus dem Nachlass des der Wissenschaft leider zu früh entrissenen B. Riemann lehrt uns die Gedanken kennen, welche sich dieser mit einer so ungewöhnlichen Penetrationskraft ausgerüstete Geist in den letzten Monaten seines Lebens über die Aufgaben der physiologischen Akustik und über die Mängel ihrer bisherigen Lösungen gebildet hatte. Auch hier hatte er schnell wieder den wesentlichen Punkt herausgefunden, welcher das Centrum aller Schwierigkeiten bildet, und auf welchen zunächst die wissenschaftlichen Strebungen hin gerichtet sein müssen. Er hebt es als die Hauptaufgabe der Mechanik des Ohres hervor die Möglichkeit zu erklären, dass der Trommelhöhlenapparat so ausserordentlich fein abgestufte Bewegungen von der Luft auf das Labyrinthwasser übertrage, wie er dies wirklich thut. Er belegt durch Rechnungen, dass die Excursionen des Steigbügels bei schwächeren, aber noch deutlich unterscheidbaren Tönen zum Theil so klein sein müssen, dass sie auch durch die stärksten Vergrösserungen unserer jetzigen Mikroskope nicht sichtbar gemacht werden könnten. Um Bewegungen von dieser Zartheit regelmässig und sicher zu übertragen, verlangt er eine entsprechende Präcision und Sicherheit in den Bewegungen des übertragenden Apparates.

Er spricht dabei aus, dass er der von mir in der Lehre von den Tonempfindungen vorgetragenen Theorie von den Bewegungen des Ohrs vielfach entgegen zu treten genöthigt sein würde. Ich muss in dieser Beziehung bemerken, dass ich die Darstellung der Bewegungen des Trommelhöhlenapparats in Abtheilung I, Abschnitt 6

des genannten Buchs selbst nur als eine vorläufige, nach fremden Quellen gegebene betrachtet habe. Es war mir damals unmöglich eigene Untersuchungen auch noch über diese Frage anzustellen, obgleich ich die Nothwendigkeit neuer Untersuchungen darüber sehr wohl kannte. Ich habe mich also dort im Wesentlichen der Darstellung von Ed. Weber[1]) angeschlossen, die den älteren Theorien gegenüber einen sehr wesentlichen Fortschritt enthält, und jedenfalls in ihren Grundzügen das Richtige trifft, wenn auch noch gewisse Ergänzungen und genauere Ausführungen derselben nicht entbehrt werden konnten.

Die Hauptschwierigkeit in dieser Theorie, welche mir auffiel, knüpfte sich an die Existenz des Hammer-Amboss-Gelenkes. Nach Weber's Darstellung sollten Hammer und Amboss zusammen einen festen Winkelhebel bilden, dessen Drehungsaxe vom Processus Folianus des Hammers zur Spitze des kurzen Fortsatzes des Ambosses hinüberläuft. Wie war die Existenz eines von einer schlaffen und schwachen Kapselmembran zusammengehaltenen, in den meisten Richtungen sehr nachgiebigen Gelenkes in der Mitte dieses Hebels mit der hier nöthigen Sicherheit und Feinheit der Bewegungen zu vereinigen?

Sobald der Abschluss der physiologischen Optik mir Zeit zu anderen Untersuchungen liess, habe ich die oben bezeichnete Frage in Angriff genommen, und hatte die meisten der hier folgenden Resultate schon gewonnen, ehe mir Riemann's Notizen zukamen[2]). Die Auflösung der Schwierigkeiten, wie sie sich bei genauerer Untersuchung der Mechanik der Gelenke und der Befestigungen der Gehörknöchelchen ergiebt, ist freilich eine ganz andere, als der berühmte Mathematiker sie sich gedacht zu haben scheint. Auch muss ich insoweit gegen seine Formulirung der Aufgabe des Gehörorgans Widerspruch erheben, als ich es durch die bekannten Thatsachen keineswegs für erwiesen halte, dass der Paukenhöhlenapparat völlig treu „die Druckänderung der Luft in jedem Augenblicke in constantem Verhältniss vergrössert auf das Labyrinthwasser übertrage.“ Die Genauigkeit der Wahrnehmung erfordert nur, dass jeder

---

1) Berichte über die Verhandlungen der Königl. Sächs. Ges. d. Wissensch. zu Leipzig. Math. Phys. Klasse. 1851. Mai 18. S. 29–31.

2) Eine vorläufige kurze Darstellung derselben habe ich in der Sitzung des hiesigen naturhist. medic. Vereins gegeben. Sitzung vom 26. Juli und 9. Aug. 1867. — Abgedruckt in den Heidelberger Jahrbüchern.

Ton von constanter Höhe immer wieder, so oft er vorkommt, eine Empfindung von gleicher Art und Intensität auslöse. Dass Töne gewisser Höhe das Ohr unverhältnissmässig stark afficiren, ist schon bekannt. Andere neue Beispiele von Abweichungen werden wir im Folgenden kennen lernen.

§. 1.

Was aus der Kleinheit der Dimensionen des Gehörorgans folgt.

Der bedeutendste Fortschritt, welchen Ed. Weber in der Theorie der Schallleitung im Ohre gemacht, und der, vielleicht weil er in zu kurzer Weise von ihm mehr angedeutet als ausgesprochen war, noch immer nicht so vollständig, wie er es verdient, berücksichtigt wird, scheint mir in der Einsicht zu beruhen, dass die Gehörknöchelchen und das Felsenbein bei der Leitung der Schallschwingungen als feste, incompressible Körper, das Labyrinthwasser als incompressible Flüssigkeit zu betrachten sind. Er spricht es mit Recht aus, dass es sich hier nicht um Fortleitung von Verdichtungs- und Verdünnungswellen in diesen Körpern und Flüssigkeiten handle, sondern dass die Gehörknöchelchen als feste Hebel, das Labyrinthwasser als eine nur im Ganzen zu bewegende Flüssigkeitsmasse zu betrachten seien.

Ich erlaube mir zunächst diesen Punkt, der die Grundlage aller der folgenden Untersuchungen bildet, näher zu begründen.

Wenn in einem nach allen drei Dimensionen des Raumes unendlich ausgedehnten elastischen Medium, sei es nun fest, flüssig oder luftförmig, ebene Wellen erregt werden, die einem einfachen Tone entsprechen, so schreiten diese mit der ihrer Schwingungsweise zukommenden Schallgeschwindigkeit in der elastischen Masse fort, und erregen an verschiedenen Stellen der Masse theils Verschiebungen der Theilchen, theils auch, wenn sie von longitudinalen Schwingungen herrühren, Verdichtungen der Masse. Befinden sich zur Zeit an einem bestimmten Punkte der Masse Theilchen, die in ihrer äussersten Abweichung nach oben begriffen sind, so sind um eine halbe Wellenlänge davon entfernt andere zu finden, die in äusserster Verschiebung nach unten begriffen sind; dasselbe gilt für die übrigen Verschiebungsrichtungen. Zwischen diesen Grenzen äusserster Verschiebung nach oben und nach unten, die also in dem vorausgesetzten Falle immer mindestens um eine halbe Wellenlänge auseinanderliegen, finden wir in continuirlichem

Uebergange die geringeren Grade der Verschiebung nach oben, den Nullwerth dieser Verschiebung und die geringeren Grade der Verschiebung nach unten, so dass der Unterschied in der Verschiebung zweier oscillirender Theilchen, deren Entfernung verschwindend klein gegen die Wellenlänge ist, selbst verschwindend klein ist gegen die ganze Amplitude der Verschiebung. Beschränken wir uns also in einem solchen Falle auf die Betrachtung eines kleinen Theils der schwingenden Masse, dessen Dimensionen alle verschwindend klein sind verglichen mit der Wellenlänge, so werden auch die relativen Verschiebungen der einzelnen Punkte dieser kleinen Masse gegen einander verschwindend klein sein müssen im Vergleich mit der Amplitude der ganzen Schwingungen, die selbst immer bei regelmässig fortgepflanzten Schallschwingungen als verschwindend klein gegen die Wellenlänge betrachtet werden muss. Jene relativen Verschiebungen der einzelnen Punkte der kleinen Masse, die wir uns ausgeschieden denken aus dem Ganzen, gegen einander sind also verschwindend kleine Grössen zweiter Ordnung im Vergleich zur Wellenlänge, verschwindend kleine Grössen erster Ordnung im Vergleich zu den Amplituden der Schwingung und zu den linearen Dimensionen der kleinen Masse, der sie angehören. Das heisst: diese bewegt sich in dem genannten Falle merklich so, wie es ein absolut fester Körper thun würde.

Das Verhältniss wird nicht geändert, wenn eine grosse Zahl ebener Wellen, die demselben einfachen Tone angehören die elastische Masse durchziehen; auch nicht wenn Kugelwellen, von irgend welchen Erregungscentren in der Masse ausgehend, sich durch dieselbe verbreiten, ausgenommen in nächster Nachbarschaft von punktförmigen oder linienförmigen Erregungscentren selbst, deren Vorkommen aber mehr eine mathematische Fiction als ein praktisch vorkommender Fall ist.

Derselbe Satz bleibt nun auch für feste elastische Körper gültig, wenn ihre Masse nicht unendlich ausgedehnt ist nach allen Seiten, sondern Grenzen hat, an denen die Schallwellen zurückgeworfen wieder in das Innere der Masse zurückkehren; vorausgesetzt nur, dass entweder keine lineare Dimension der schwingenden Masse sehr klein im Vergleich zur Wellenlänge werde, oder aber dass dieses mit allen Dimensionen der schwingenden Masse gleichzeitig geschehe, so dass keine derselben sehr klein gegen die übrigen wird, wie dies bei Platten, Membranen, Stäben, Saiten der Fall ist.

Der Beweis für diese Sätze erhellt, so lange nur von ebenen Wellen einfacher Töne in unendlich ausgedehnten Massen die Rede ist, leicht aus den bekannten Sätzen über die Form und die Schwingungsweise der ebenen Wellen. Der Einfluss der Grenzflächen dagegen und der letztgenannten Bedingungen ist von Kirchhoff entwickelt worden in seiner Abhandlung über das Gleichgewicht und die Bewegung eines unendlich dünnen elastischen Stabes[1]). Allerdings ist in dieser Abhandlung zunächst nur vom Gleichgewichtszustande solcher elastischer Massen die Rede, und wird daselbst bewiesen, dass Kräfte, welche unendlich klein sind, verglichen mit den Elasticitätsconstanten des Körpers, und welche theils die innern Theile, theils die äussere Oberfläche der elastischen Masse angreifen, nur unendlich kleine relative Verschiebungen solcher Punkte der Masse gegen einander hervorbringen, welche in endlicher Entfernung von einander liegen, so dass dabei auch die Differentialquotienten der Verschiebungen, nach den Coordinaten genommen, endlich bleiben. Auf diesen letzteren Punkt kommt es wesentlich an. Denn wenn diese Differentialquotienten endliche Grössen sind, so sind in Massen von verschwindend kleinen linearen Dimensionen auch die relativen Verschiebungen ihrer einzelnen Punkte gegen einander verschwindend klein gegen die ganzen absoluten Verschiebungen, welche solche Massen erleiden.

Was Kirchhoff, wie gesagt, für den Gleichgewichtszustand erwiesen hat unter Voraussetzung unendlich kleiner Kräfte, lässt sich mittels des d'Alembert'schen Princips auch auf den Zustand der Bewegung übertragen, indem man die Beschleunigungen, welche die Massentheilchen bei ihrer Bewegung erleiden, als die den elastischen Körper deformirenden Kräfte ansieht. Diese sind nun verschwindend klein, wenn sie Schwingungen von einer im Vergleich zur Wellenlänge unendlich kleinen Amplitude angehören[2]),

1) Borchardt's Journal für reine und angewandte Mathematik LVI in §. 1 der genannten Abhandlung.

2) Ist nämlich A die Amplitude der Schwingung und n die Schwingungszahl eines einfachen Tones, t die Zeit und c eine die Phase bestimmende Constante, so ist die veränderliche Abweichung s von der Gleichgewichtslage.

$$s = A \sin \left\{ 2\pi n t + c \right\}$$

Wenn μ die Masse des Theilchens ist, so ist die zur Beschleunigung desselben gebrauchte Kraft k gleich

und entsprechen somit der von Kirchhoff gemachten Annahme unendlich kleiner störender Kräfte.

Der von Kirchhoff erwiesene Satz auf die uns vorliegenden Verhältnisse übertragen, kann also so ausgesprochen werden:

In festen elastischen Körpern, bei denen entweder sämmtliche lineare Dimensionen im Vergleich zur Wellenlänge nicht verschwindend klein sind, oder wenigstens keine von ihnen verschwindend klein gegen die übrigen ist, bringen Schwingungen eines einfachen Tones, deren Amplitude unendlich klein ist, verglichen mit der Wellenlänge der gleichen Art von Schwingungen in unendlich ausgedehnten Massen, für zwei Punkte des elastischen Körpers, deren Entfernung von einander selbst wieder verschwindend klein gegen dieselbe Wellenlänge ist, relative Verschiebungen hervor, welche verschwindend klein gegen die ganze Amplitude der Schwingungen sind.

Das heisst also, dass unter den bezeichneten Einschränkungen sich Massen, deren lineare Dimensionen alle klein gegen die Wellenlänge sind, merklich wie absolut feste Körper bewegen, oder dass die Formveränderungen, die sie erleiden, zu vernachlässigen sind im Vergleich zur ganzen Amplitude ihrer Bewegungen.

Wenn wir nun berücksichtigen, dass in Luft die Wellenlängen der Töne unserer musikalischen Scala zwischen dem C_{-1} von 33 bis zum c_5 von 4224 Schwingungen, Werthe haben, die zwischen den

---

$$k = \mu \frac{d^2 s}{dt^2} = -4\pi^2 n^2 A \sin \left\{ 2\pi n t + c \right\}$$

Ist nun λ die Wellenlänge, und a die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der betreffenden Art von Schwingungen in unbegrenzten Massen, so ist

$$n = \frac{a}{\lambda}.$$

Also für das Maximum von k, welches eintritt, so oft der Sinus der dafür gegebenen Formel gleich ± 1 wird:

$$\frac{k}{a^2} = \pm 4\pi^2 \frac{A}{\lambda^2}.$$

Es ist also k unendlich klein im Vergleich zu a^2, wenn A unendlich klein im Vergleich zu λ; und a^2 multiplicirt mit der Dichtigkeit ist gleich der Constanten des elastischen Widerstandes, die bei der betreffenden Art der Vergleichung in Geltung tritt.

Grenzen von einerseits 1000, andrerseits 8 Ctm. enthalten sind, dass im Wasser dieselben mehr als vier Mal grösser, in Messing etwa eilf Mal, in Kupfer zwölf Mal, in Stahl und Glas mehr als fünfzehn Mal grösser sind, als in Luft, dass dagegen die Dimensionen der Gehörknöchelchen und des Gehörlabyrinths meist nur kleine Bruchtheile eines Centimeters betragen, so ergiebt sich das wichtige Factum, dass die Dimensionen der elastischen festen und flüssigen Massen, welche den Gehörapparat zusammensetzen, alle jedenfalls nur sehr kleine Bruchtheile der Wellenlängen derjenigen Töne sind, die gewöhnlich vorkommen, und gegen welche unser Ohr gut empfindlich ist.

Daraus ist also nach dem voraus Gesagten weiter zu folgern, dass bei den durch die gewöhnlich hörbaren Töne hervorgerufenen Schwingungen des Gehörapparates, der Gehörknöchelchen und des Felsenbeins, die Theilchen jeder einzelnen von diesen kleinen Massen gegen einander nur Verschiebungen erleiden, welche verschwindend klein sind im Vergleich mit der Amplitude der betreffenden Schallschwingungen, das heisst, dass sie sich annähernd wie absolut feste Körper bewegen.

Der letzte Grund dieser Eigenthümlichkeit der Bewegung liegt in der sehr grossen Geschwindigkeit, womit sich die Einwirkung jeder Kraft oder jedes Anstosses auf eine dieser kleinen festen Massen durch sie hin verbreitet. Diese Geschwindigkeit ist so gross, dass die zur Verbreitung des Anstosses nöthige Zeit im Vergleich zur Dauer der Schallschwingungen der Regel nach als verschwindend klein, und die Einwirkung daher als augenblicklich durch die ganze Masse verbreitet betrachtet werden kann.

Eine incompressible Flüssigkeit von festen Wänden eingeschlossen unterscheidet sich von einer compressiblen ebenfalls dadurch, dass jeder Anstoss, der einen Theil ihrer Oberfläche trifft, sich sogleich durch die ganze Flüssigkeit verbreitet, und jeden Theil derselben augenblicklich in Bewegung setzt; während in einer compressiblen Flüssigkeit, von dem Orte der Einwirkung eine Welle ausgeht, die mit einer gewissen Geschwindigkeit abläuft, und nach einander die verschiedenen Theile der Flüssigkeit in Bewegung setzt. Wenn also wie bei dem Labyrinthwasser die Dimensionen der ganzen Masse verschwindend klein gegen die Wellenlänge sind, und die Wände des Felsenbeins, die es einschliessen, so fest, dass sie den hier in Betracht kommenden geringen Druckkräften gegenüber als

absolut fest betrachtet werden dürfen, so geschieht die Ausbreitung der Wirkung durch die ganze Masse so gut wie augenblicklich, und das Labyrinthwasser bewegt sich dann unter dem Einflusse der Schallschwingungen nicht merklich anders, als sich eine absolut incompressible und daher der Schallschwingungen unfähige Flüssigkeit unter denselben Verhältnissen bewegen würde.

Endlich ist das Gleiche auch auf die in dem Gehörgange und der Trommelhöhle enthaltene Luft anzuwenden, wenigstens für die tieferen und mittleren Töne der Scala. Bei sehr hohen Tönen, der obersten Octave des Claviers entsprechend, kommt allerdings die Länge des Gehörgangs einer Viertelwellenlänge nahe, und es treten die von mir beschriebenen Resonanzphänomene auf[1]). Jedenfalls ist aber der Querdurchmesser des Gehörgangs zu gering, als dass etwa vor verschiedenen Theilen des Trommelfells gleichzeitig wesentlich verschiedene Phasen des Drucks oder der Geschwindigkeit eintreten könnten, und wir dürfen daher unbedenklich den Luftdruck an der ganzen Fläche des Trommelfells immer als gleich ansehen. Es ist dieser Umstand ebenfalls für den Mechanismus des Ohrs von grosser Bedeutung, weil dadurch jede Möglichkeit einer nach der Localität des tönenden Körpers verschiedenen localen Erregung des Trommelfells ausgeschlossen wird, und deshalb in der Empfindung kein andres Zeichen für verschiedene Localisation des Schalles übrig bleibt, als die verschiedene Schallstärke, welche bei verschiedener Haltung des Kopfes und in der Vergleichung der Empfindungen beider Ohren beobachtet werden kann.

Die oben hingestellte Regel bezieht sich, wie mehrfach hervorgehoben worden ist, auf solche Körper, an denen keine ihrer linearen Dimensionen gegen die übrigen verschwindend klein ist, also nicht auf Fäden, Membranen, Stäbe und Platten. Sie erleidet auch Ausnahmen, wenn nur irgend ein mittlerer Theil des betreffenden Körpers sehr schmal und zusammengeschnürt ist. Unter den Bestandtheilen des Gehörorgans ist es nur das Trommelfell, welches unter diese Ausnahme fällt. In der That sind solche nach einer Richtung oder an einer Stelle sehr dünnen Körper verhältnissmässig langsamer Schwingungen fähig, Ausbiegungen derjenigen Art nämlich, denen der Körper wegen seiner geringen Dicke geringen elastischen Widerstand entgegen setzt, gleichen sich langsam wieder aus und pflanzen

1) Lehre von den Tonempfindungen S. 175 u. 176.

sich mit viel geringerer Geschwindigkeit fort, als dies die Oscillationen in dicken Massen derselben Art thun.

Dass die Gehörknöchelchen nicht unter diese Ausnahme fallen, erhellt leicht, wenn man sie vergleicht mit den metallenen Stäben oder Zungen, welche wir gebrauchen um hohe Töne zu erzeugen. Die Zungen, welche für die höchsten Töne der musikalischen Scala in einem Harmonium gebraucht werden, sind relativ sehr lang und sehr dünn, wenn wir sie mit den Dimensionen der Gehörknöchelchen vergleichen, und es kann für Jemand, der einige Erfahrung über die Eigentöne von solchen festen Körpern hat, nicht zweifelhaft bleiben, dass, wenn es überhaupt möglich wäre, so kleine Massen, wie die Gehörknöchelchen, selbst den relativ dünn gebauten Steigbügel nicht ausgenommen, in stehende Schwingungen zu versetzen, diese enorm hohe Töne geben würden, die weit jenseits der Grenzen unserer musikalischen Scala liegen, und unserem Ohre wahrscheinlich nicht mehr vernehmbar sein würden.

Das Verhältniss der Gehörknöchelchen gegen die Schallschwingungen ist praktisch dasselbe, wie das einer eisernen Stange, die als Pendel aufgehängt ist, bei den Pendelschwingungen. Auch eine solche Stange ist elastisch, kann sich biegen und Eigenschwingungen verschiedener Art ausführen, von denen aber viele hundert auf eine Secunde kommen, während sie als Pendel vielleicht nur ein Mal in der Secunde schwingt. Wenn ein solches Pendel in Mitschwingen versetzt wird durch eine periodisch wechselnde Kraft, deren Periode eine oder mehrere Secunden oder grössere Bruchtheile einer Secunde beträgt, so kann jeder Anstoss, den eine solche Kraft einem Punkte der Stange mittheilt, viele hundert Male in der Stange hin und her laufen, ehe der entsprechende Anstoss der nächsten Periode erfolgt, und so seine Wirkung vollständig über die ganze Masse der Stange ausbreiten, ehe auch nur erst ein kleiner Bruchtheil der Schwingungsperiode abgelaufen ist. Unter diesen Umständen bewegt sich das Pendel praktisch wie ein absolut fester Körper, das heisst: seine wirkliche Bewegung ist von der eines solchen nicht merklich unterschieden auch für die feinsten Beobachtungsmethoden. Ganz anders verhält es sich, wenn wir das Pendel durch einen Ton in Erschütterung versetzen, dessen Tonhöhe einem der Eigentöne der Stange sich nähert. Dann bewegt sich diese nicht mehr nach den Gesetzen des Pendels, sondern als schwingender elastischer Stab.

Dasselbe gilt für die Gehörknöchelchen. So lange die Schwin-

gungsperioden der zugeleiteten Töne sehr gross sind, im Vergleich mit denen der Eigentöne der Gehörknöchelchen, so lange müssen sich diese praktisch als absolut feste Körper bewegen.

§. 2.

Anatomisches über das Trommelfell.

Ehe ich zur Erörterung der mechanischen Wirkungen des Trommelhöhlenapparats übergehen kann, muss ich noch einiges Anatomische besprechen, nicht als ob ich hier wesentlich Neues vorzutragen hätte, sondern nur, weil unter einer eingehenderen Untersuchung des physiologischen Zusammenhangs eine Menge kleine Einzelheiten, die der Anatom gelegentlich wohl bemerkt und dann an ihnen vorbeigeht, hervorragende Wichtigkeit gewinnen können, und deshalb theils in das Gedächtniss des Lesers zurückgerufen, theils mit Sorgfalt bestätigt werden müssen.

Die Oeffnung, in welche das Trommelfell eingesetzt ist, wird bekanntlich von dem Schuppentheile des Schläfenbeins und dem ehemaligen Paukenringe gebildet, welche beide an Erwachsenen fest knöchern verschmolzen sind; freilich nicht so fest, dass nicht gelegentlich beim Ausmeisseln eines Gehörpräparats gerade an jener Verschmelzungsstelle der Knochen leicht bricht, was ich für die Darstellung der oberen Verbindungen des Trommelfells recht hinderlich fand. Auch am trocknen Knochen des Erwachsenen ist diese Scheidung noch ziemlich deutlich dadurch angedeutet, dass an der Grenze beider Theile, vorn und hinten Knochenvorsprünge herausragen, welche einen unteren ziemlich regelmässig oval begrenzten, und von einer Ansatzrinne des Trommelfells umsäumten Theil der Oeffnung von einem oberen stärker concaven und unregelmässiger begrenzten Ausschnitt trennen. Ersterer gehört dem Os tympanicum, letzterer dem Os squamosum an. In Fig. 1 ist die obere vordere Wand des knöchernen Gehörgangs abgebildet von einem Schläfenbein, welches parallel dieser Wand durchschnitten ist; $a\ b$ ist die Durchschnitts-

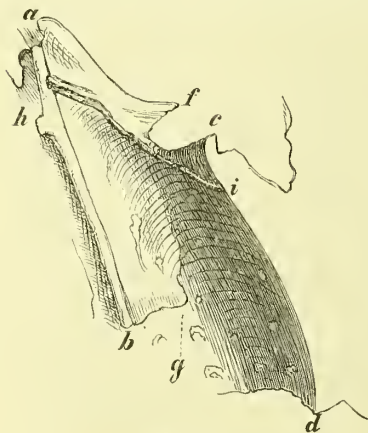


Fig. 1.

fläche der vorderen Wand, welche den Gehörgang gegen das Kiefergelenk abgrenzt; *c d* die Durchschnittslinie der hinteren Wand; *b d* ist die äussere Oeffnung des Gehörgangs; eine leichte Furche *h i*, die in der Zeichnung etwas stärker ausgeprägt worden ist, als es in Wirklichkeit der Fall war, bezeichnet die Ansatzlinie des Trommelfells. Von der Spitze *f* nach *g* hin sieht man noch die Andeutung der Spalte verlaufen, welche beim Fötus den vorderen oberen Rand des Paukenrings von der Schuppe trennte. Zwischen *a* und *h* ist dieselbe Spalte (Fissura Glaseri) ebenfalls erkennbar. Die bei *f* hervorragende Spitze, welche eine wichtige Bedeutung für die Befestigung des Hammers hat, nennt Henle Spina tympanica posterior im Gegensatz gegen eine andere beim Fötus deutlicher ausgesprochene Spitze am vorderen Ende des Paukenrings, an dessen vorderer äusserer Ecke, die er Spina tympanica anterior nennt, und der an dem viel breiter gewordenen Os tympanicum des Erwachsenen die Spitze *g* entsprechen möchte. Letztere liegt aber der entsprechenden Fläche der Schläfenschuppe eng an, und tritt nicht mehr als Spina hervor. Dagegen sieht man am hinteren Ende des oben erwähnten Ausschnitts, etwa der Stelle zwischen *c* und *i* unserer Fig. 1 entsprechend eine stumpfere, weniger ausgesprochene Hervorragung des Befestigungsrandes des Trommelfells, die wir bei Beschreibung dieser Befestigung noch öfter werden zu erwähnen haben. Um nun nicht Irrthümer zu veranlassen, dadurch dass ich für die vordere *f* dieser beiden Spitzen Henle's Namen Sp. tymp. posterior brauche, werde ich mir erlauben, diese mit dem Namen Spina tympanica major und die hintere bei *i* mit dem Namen Spina tympanica minor zu belegen.

In den Ausschnitt, der zwischen *f* und *c* liegt, schiebt sich der Hals des Hammers ein, so dass die Spitze von *f* ihn beinahe berührt. Eine etwas flachere und weniger scharf begrenzte Ausbuchtung, wie die zwischen *f* und *i* in Fig. 1 sichtbare, zeigt nun auch noch die Ansatzlinie des Trommelfells, wo sie dicht vor jenen Punkten vorbeiläuft. Doch ist diese Linie gerade an diesem Punkte viel weniger scharf gezeichnet, als am untern vom Os tympanicum gebildeten Theile seines Ansatzes; wie denn auch gerade hier das Trommelfell schon durch leises Drängen mit einem stumpfen Instrumente leicht von seinem Ansatz zu lösen ist, und eigentlich mehr an die Cutis, als an den Knochen befestigt ist.

Wir wollen diesen Ausschnitt des oberen Randes an der ge-

nannten Stelle den Rivinischen Ausschnitt nennen, da er die Stelle des von Rivini beschriebenen, aber in der Majorität normaler erwachsener Individuen nicht existirenden Loches einnimmt, welches der letzte Rest der ersten Visceralspalte ist.

Wenn nun auch dort normaler Weise keine Oeffnung besteht, so ist doch der Rivinische Ausschnitt von einem schlaffen Theile des Trommelfells ausgefüllt, der unter der dünnen Cutis mit dieser und unter sich nur locker verwebte, leicht zu trennende schlaffe Bindegewebbündel zeigt, von durchziehenden Nerven und Gefässen durchbrochen, (Membrana flaccida Shrapnell). Eben deshalb brechen auch hier Abscesse leicht durch, und gerade hier macht man beim Abpräpariren der Cutisschicht leicht künstliche Oeffnungen. Man fühlt den Unterschied der Spannung und Consistenz dieses oberen Theils des Trommelfells in Vergleich zu dem Reste der Membran, wenn man das obere abgerundete Ende einer Nähnadel an einem Präparate, wo die Befestigungen der Gehörknöchelchen und des Trommelfells noch unverletzt erhalten sind, über die Fläche des letzteren gleiten lässt. Man fühlt dann, wie zwischen der Spina tympanica major und minor ein ziemlich fest gespannter Strang von Fasern liegt, in den sich der Processus brevis des Hammers gegen den vorderen Rand hin einschaltet. Dieser Strang bildet die obere Grenze für den unteren festeren Theil der Membran. Sobald die tastende Nadel über ihn hinübergleitet, sinkt sie plötzlich ein, indem sie die schlaffe Cutis und Bindegewebmasse des Rivinischen Ausschnittes zurückdrängt. Auch wenn man nur die Wölbung der äusseren Fläche des Trommelfells an einem passenden Präparate und bei schräger Beleuchtung aufmerksam betrachtet, zeichnet sich in der Regel dieser von dem Processus brevi Mallei gegen die Spina tympanica minor gerichtete Strang aus, der, so weit ich erkennen konnte, übrigens nur durch die eigenthümlichen Sehnenfaserzüge des Trommelfells gebildet wird. Wir wollen diesen Faserzug den oberen Befestigungsstrang des Trommelfells nennen. Er bildet die Grenze für den bei den Schallschwingungen in Betracht kommenden Theil der Membran.

An der inneren Seite geht von der Ansatzlinie aus die Membrana flaccida in das Gewebe der Schleimhautfalte über, welche die von Tröltsch beschriebene hintere Paukenfelltasche bildet, und in deren unterem freien Rande die Chorda Tympani verläuft. Die Ansatzlinien des Trommelfells und der genannten Falte stossen

an der Tiefe der Wölbung der Rivinischen Ausbuchtung zusammen; hier hängen beide auch fester unter einander zusammen, als sie es mit dem Knochen thun; nach hinten hin verläuft dann aber die Ansatzlinie der Schleimhautfalte nicht längs des Ansatzes des Trommelfells, sondern längs der scharfen Kante des in Fig. 1 bei *c* dargestellten keilförmigen Knochenvorsprungs, dessen äussere Fläche dem Trommelfell fast parallel, wenig entfernt von diesem nach innen liegt, und auch von aussen her weisslich durch das halbdurchsichtige Trommelfell hindurchschimmernd bemerkt werden kann. Weiter nach unten hin findet sich gerade auf seiner vorspringenden Kante die Oeffnung für den Austritt der Chorda tympani. Der kleine Ausschnitt der bei *c* Fig. 1 hinter der Kante bemerkbar wird, ist der Durchschnitt einer rinnenförmigen Fortsetzung des Kanals der Chorda. Bis zum Austritt der Chorda reicht auch die Schleimhautfalte der hinteren Paukentasche herab. Der Nerv bildet gerade ihren Rand.

Nach vorn von der höchsten Ausbuchtung des Rivinischen Ausschnitts verläuft die Ansatzlinie der Schleimhautfalte am Trommelfell selbst, gegen den kurzen Fortsatz des Hammers hin. Dieser Theil der Falte scheidet die vordere kleinere von der hinteren grösseren Paukenfelltasche. Die Ansatzlinie am Hammer werden wir später zu beschreiben haben.

Der Rivinische Ausschnitt liegt nach vorn und oben am Trommelfell. Dessen grösster Durchmesser läuft ziemlich senkrecht vom hintern Ende des Ausschnitts oberhalb der Spina tympanica minor nach unten herab. Seine Länge habe ich an einer Reihe von Präparaten gemessen, und finde sie übereinstimmend mit den Angaben von Tröltsch gleich 9 bis 10 Mm. Der kleinste Durchmesser liegt nahehin horizontal und beginnt etwas unterhalb der Spina tympanica major. Seine Länge fand ich zu $7\frac{1}{2}$ bis 9 Mm. Diese Durchmesser haben übrigens an kindlichen Schädeln im Ganzen dieselbe Grösse, wie bei Erwachsenen.

Das innere Ende des Gehörgangs ist bekanntlich nach innen und ein wenig nach unten gerichtet; die Ebene, welche durch die Ansatzfurche des Trommelfells zu legen ist, ist wiederum gegen die Axe des Gehörgangs stark geneigt, so dass sie mit letzterer einen Winkel bildet, den man auf 55 Grade schätzt, während die Paukenfelle beider Seiten mit einander einen nach oben geöffneten stumpfen Winkel von etwa 130 bis 135 Graden bilden.

Das Paukenfell ist nun aber nicht flach in seinem Ansatzringe ausgespannt, sondern seine Mitte, oder Nabel, ist durch den daran befestigten Handgriff des Hammers stark nach innen gezogen, und die Membran hat deshalb eine trichterförmige Gestalt, so dass die Spitze des Hammergriffs der Spitze des Trichters entspricht, und die Meridianlinien des Trichters gegen seine Höhlung hin convex gewölbt sind. Um diese Gestalt des Trommelfells, die für die Mechanik der Schallleitung von grosser Wichtigkeit ist, anschaulich zu machen, habe ich von einem Präparate, an dem die untere Wand des Gehörgangs fortgenommen, und dadurch das Trommelfell freigelegt war, welches übrigens in seinen Verbindungen ungestört blieb, einen Abguss der oberen Wand des Gehörgangs und der äusseren Fläche des Trommelfells mit Stearin gemacht, und dessen Umrisslinie in Fig. 2 abgebildet, wie ich sie in der Camera clara nachgezeichnet habe; *a b* ist die obere Wand des Gehörgangs, *b c* die verticale Umrisslinie des Trommellfells; die übrigen Theile sind nach anderen Präparaten ergänzt.

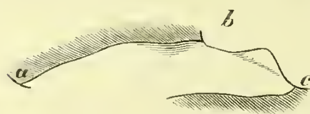


Fig. 2.

Die gegen den Gehörgang gekehrte convexe Wölbung der auf der Fläche des Trommelfells gezogenen Radien ist hier sehr deutlich. Zugleich sieht man, wie in Folge dieser Einziehung des Nabels die obere Hälfte des Trommelfells fast in gleiche Richtung mit der obern Wand des Gehörgangs zu liegen kommt, und die untere fast senkrecht auf der Axe dieses Ganges steht. Dieser letztere Umstand ist für die Untersuchung des Ohrs mit dem Ohrenspiegel von Wichtigkeit, weil nämlich der senkrecht gegen die Axe des Gehörgangs gekehrte Theil des Trommelfells, welcher in der Regel dicht unter dem Ende des Hammerstieles liegt, das von aussen in das Ohr geworfene Licht wieder gegen den Ausgang des Gehörgangs zurück reflectirt, und deshalb als eine dreieckige glänzende Stelle erscheint.

Die äussere Oberfläche des Trommelfells, welche zunächst mit einer Epithelialschicht überkleidet ist, der Fortsetzung der hornigen Epidermis der Haut des Gehörgangs, bekommt die Fähigkeit Licht zu reflectiren dadurch, dass sie fettig ist. An einem möglichst frisch geöffneten Ohre sieht man Wassertropfen von dieser fettigen Fläche abfliessen, wie von geöltem Papier.


Fig. 3.

Die convexe Wölbung der Meridiane des Trommelfells ist in demjenigen Meridiane am geringsten, in welchem der Stiel des Hammers sich an das Trommelfell anlegt. In Fig. 3 ist die entsprechende Umrisslinie des oben erwähnten Stearinabgusses dargestellt, und die Lage des Hammers durch punktirte Linien angedeutet. Man erkennt in dieser Zeichnung auch gleichzeitig, dass der Nabel etwas unter der eigentlichen Mitte des Trommelfells liegt.

Der Meridian, in welchem der Hammerstiel befestigt ist, läuft vom Nabel des Trommelfells nach oben und vorn gegen die vordere Grenze des Rivinischen Ausschnitts hin, so dass der kurze Fortsatz des Hammers, welcher das obere Ende des Stiels begrenzt, nahe hinter dem äusserlich am Ansatz des Trommelfells der innen hervorragenden Spina tympanica major entsprechenden Vorsprung zu liegen kommt. An jene Spina ist der Hammer theils durch eine straffe Bandmasse (Ligamentum mallei anterius), theils durch seinen sogenannten langen Fortsatz (Processus Folianus) angeheftet. Letzterer legt sich, so lange er existirt, in eine Furche am innern Rande jener Spina.

Während die Spitze des Hammerstiels den Nabel des Trommelfells nach innen zieht, wird diese Membran bekanntlich durch den kurzen Fortsatz an der Basis des Hammerstiels etwas nach aussen gedrängt.

Das Trommelfell besteht der Hauptsache nach aus einer eigenthümlichen, zwar nur etwa $1/_{20}$ Mm. dicken, aber verhältnissmässig sehr festen Sehnenmembran, die nach aussen von einer dünnen Fortsetzung der Haut des Gehörganges, innen dagegen von einer dünnen Fortsetzung der Schleimhaut der Paukenhöhle überzogen wird. Zusammengenommen haben diese Schichten etwa 0,1 Mm. Dicke. Die äussere Hautschicht besteht hauptsächlich aus einer Fortsetzung der Epidermis, welche von einer dünnen Schicht lose verwebter Bindegewebbündel getragen wird. Sie lässt sich von dem grössten Theile der Fläche des Trommelfells ziemlich glatt abpräpariren, nur an der Rivinischen Lücke und längs des Stieles des Hammers [1])

1) Gruber's schräg abwärts steigende Fasern des Trommelfells schliessen sich hier den Fasern der Cutis als tiefste Schicht derselben in mechanischer Beziehung an, wenn sie auch vielleicht histologisch unterschieden werden können.

hängt sie fester mit dem daselbst verdickten und knorpelartigen Gewebe des Trommelfells zusammen. Von der Rivinischen Lücke aus läuft dann auch an der oberen Wand des Gehörganges eine Linie festeren Zusammenhanges der Haut des Gehörgangs mit dem Knochen aus, indem die Faserzüge der Cutis sich hier in die Fissura Glaseri die alte Spalte, welche den Paukentheil des Schläfenbeins vom Schuppentheil trennt, einsenken (Fig. 1 *fg*).

Die mittlere festere Schicht des Trommelfells ist eine fibröse Haut, die theils aus radiär, theils aus circulär verlaufenden Fasern besteht. Die radiären Fasern liegen auf der äusseren Seite, die circularen auf der innern Seite dieser Schicht. Für jene bildet in der vorderen Hälfte das Ende des Hammerstiels den Mittelpunkt ihrer Ausstrahlung. Auf der hintern Seite dagegen laufen sie mehr parallel von der ganzen Länge des Hammerstiels aus. Ihre Schicht ist längs des Randes am dünnsten und verdickt sich allmählig gegen den Hammerstiel hin, wo sie sich mehr zusammendrängen.

Die circularen Fasern bilden im Centrum des Trommelfelles eine sehr dünne Schicht, die sich gegen die Peripherie hin allmählig verdickt, die äusserste Peripherie aber frei lässt (nach Gerlach), oder (nach J. Gruber) wenigstens wieder viel dünner wird, als sie in der Mitte ist. Am Rivinischen Ausschnitt sind die Ringfasern ziemlich stark entwickelt, atlasglänzend, und bilden hier den Befestigungsstrang, der den festeren Theil des Trommelfells nach oben hin begrenzt; sie schneiden sich hier unter einem ziemlich kleinen spitzen Winkel mit den radiären Fasern, die an dieser Stelle nicht vom Nabel, sondern vom kurzen Fortsatz des Hammers ausstrahlen. Hier mischen sich dann auch die unregelmässig durcheinander geschlungenen Cutisfasern ein.

Die Sehnenfasern dieser Schichten sind sehr feste straffe Bänder, dicht neben einander liegend, und jeder Dehnung einen sehr grossen Widerstand entgegensetzend. Sie unterscheiden sich durch ihren sehr grossen elastischen Widerstand wesentlich von dem viel nachgiebigeren gelben elastischen Gewebe. Die Substanz des Trommelfelsl schwillt in Essigsäure und Kalilösungen, wie es das Sehnengewebe, nicht aber das elastische Gewebe thut. Ich fand, dass sie wie Sehnengewebe, durch Kochen in verdünnter Kalilösung schnell vollständig aufgelöst wird, wobei nur geringe Reste elastischen Gewebes zurückbleiben, welches theils deutlich noch Gefässröhren erkennen lässt, theils auch eine sehr dünne continuirliche Membran,

die wahrscheinlich die Grundlage des Schleimhautblatts an der innern Seite des Trommelfells bildet.

Diese Art der Zusammensetzung des Trommelfells ist für seine mechanische Leistungen von grösster Wichtigkeit, wie die Folge zeigen wird. Es ist nicht als elastisch nachgiebige, sondern als eine fast unausdehnsame Membran aufzufassen. Seine sehr geringe Nachgiebigkeit zeigt sich auch, wenn man es entweder in seiner natürlichen Befestigung, oder nachdem man es gelöst und auf einer Glasplatte ausgebreitet hat, mit Stecknadeln zerrt. Es zieht sich nicht aus, wie ein Kautschukblatt, oder wie ein aufgeweichtes Stück thierischer Blase, sondern es widersteht dem Zuge sehr kräftig und bildet Falten rings um die gezerrte Stelle, wie eine Collodiummembran.

§. 3.

Befestigung des Hammers.

Der Hammer ist zunächst mit dem Trommelfell in einer kürzlich von J. Gruber ausführlicher beschriebenen Weise verbunden. Der Anlagerungsstelle des Knochens entsprechend ist das Trommelfell verdickt, theils durch starke Faserzüge der Cutisschicht, welche vom Rivinischen Ausschnitt her an der Ansatzstelle des Hammers entlang ziehen, theils durch Einlagerung von faserknorpeligem Gewebe. Das Periost des Hammers geht an beiden Flächen des Handgriffs in diese faserknorpelige Verdickungsschicht über, und heftet ihn an deren Rändern fest. In der Nähe des unteren Endes des Handgriffs ist die Verbindung des Knochens mit dem verdickten Gewebe des Trommelfells eine durchaus feste; gegen den kurzen Fortsatz hin aber findet sich zwischen dem Knochen und dem Trommelfell eine nachgiebigere Schicht, oder selbst eine Art von unvollkommener Gelenkspalte, die nur an beiden Rändern durch die Verbindung des Periosts des Hammers mit den Rändern der knorpeligen Schicht und dem Fasergewebe des Trommelfells fester ist.

Mit der Spitze seines Handgriffs zieht der Hammer den Nabel des Trommelfells nach innen; um die Verbindung beider Theile zu unterhalten musste hier die Verbindung am festesten sein. Am kurzen Fortsatz drückt der Hammer gegen das Trommelfell, hier ist also eine geringere Festigkeit der Verbindung ausreichend, und gleichzeitig ist dadurch die Möglichkeit kleiner Verschiebungen des Hammers

gegen die Membran gegeben, deren Bedingungen wir weiter unten noch genauer kennen lernen werden.

Die zweite und relativ festeste Verbindung des Hammers ist die mit der Spina tympanica major. Die Spitze derselben reicht bis ganz dicht an den Hals des Hammers in den Ausschnitt bei *d* Fig. 4, den dieser dicht über der Wurzel des Processus Folianus *l* zeigt. Der Hammer ist in dieser Ansicht von der äussern Seite gesehen; *cp* ist sein Kopf, *b* der kurze Fortsatz, *m* der Handgriff, * die Gelenkfläche für den Amboss. Der Processus Folianus liegt nun längs des inneren gegen die Trommelhöhle gekehrten Randes der Spina (Kante *fa* der Fig. 1), so dass von der Spitze von *l* bis zu dem Ausschnitt bei *d* der Rand der Spina und die betreffende Kante des Hammers fast parallel und nur durch einen ganz schmalen Zwischenraum von etwa $^1/_3$ Mm. Breite getrennt neben einander herlaufen. Dieser Spalt setzt sich nach oben hin von *d* bis zu der Vertiefung bei *f* am Hammer noch fort, wo eine von der oberen Fläche der Spina nach oben laufende Knochenkannte dem Hammer gegenübersteht. Diese ganze Spalte ist mit kurzen straffen Sehnenfasern überbrückt; längere Fasern derselben Art gehen von der Fläche der Spina und von deren abwärts laufendem Rande aus, convergiren gegen den Punkt *d* des Hammers und umhüllen auch den untern Rand, so wie die äussere Fläche des Processus Folianus, so dass dieser ganz in dieser sehnigen Fasermasse, die das Ligamentum anterius Mallei bildet, und der sie überziehenden Schleimhautfalte verborgen liegt.

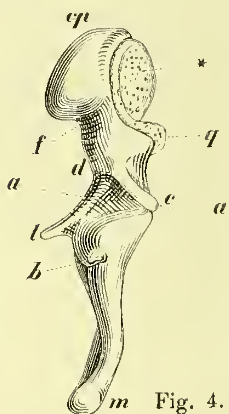


Fig. 4.

Ich muss hier noch über den Processus Folianus des Hammers bemerken, dass derselbe bei Kindern allerdings ein langes elastisches Knochenblatt ist, was bis zur Fissura Glaseri reicht. Betreffs der Verhältnisse bei Erwachsenen muss ich mich aber denjenigen Anatomen anschliessen, die ihn als zu einem kurzen Stumpfe geschwunden beschreiben. Ich bemerke, dass ich bei der Präparation mehrerer Schläfenbeine besonders darauf geachtet habe, ob etwa dieser Fortsatz erst durch das Bemühen den Hammer zu lösen abgebrochen wird. Ich habe zu dem Ende, ehe noch der Hammer aus seiner natürlichen Befestigung irgendwo gelöst war, eine feine

Nadelspitze als Sonde zwischen die Faserzüge des Ligamentum anterius Mallei eingestochen und damit nach dem Processus Folianus getastet. So konnte ich ihn deutlich eine kurze Strecke verfolgen, dann hörte er plötzlich mitten in der Masse des genannten Ligaments auf, und ich konnte keinerlei Fortsetzung des Knochenstreifen fühlen, wie sie hätte vorhanden sein müssen, wenn der Fortsatz etwa nur gebrochen gewesen wäre.

Auch muss ich noch bemerken, dass der stehen bleibende Stumpf des genannten Fortsatzes durchaus nicht direct und fest der Knochenmasse der Spina anliegt, sondern durchgehends nur durch kurze Bandmasse mit ihr verbunden ist. Man kann deshalb bei einem Präparat, wo die Verbindungen des Hammers alle vollständig erhalten sind, und dieser seine natürliche Lage hat, mittels einer auf die Wurzel des Processus Folianus aufgesetzten Nadel diese Stelle des Hammers sowohl von oben nach unten, als von innen nach aussen etwas verschieben, so viel es eben die kurzen Bandmassen des Ligamentum anterius erlauben. Die Berührung von Knochen mit Knochen tritt keiner dieser Bewegungen hindernd in den Weg.

Das Ligamentum anterius ist also der Hauptsache nach, wenn man von den oberflächlich liegenden längeren Verstärkungsfasern absieht, ein sehr kurzes und sehr breites Band, dessen Ansatzlinie am Hammer von *l* bis *f* Fig. 4 hinaufläuft, und von *l* bis *d* der inneren Kante der Spina tympanica major, bei *d* deren Spitze von *d* bis *f* einer nach oben von der Spina auslaufenden Knochenleisten nahe gegenübersteht. Ich bemerke hier noch, dass sich das Band in Form einer Schleimhautfalte noch nach oben und unten verlängert. Nach oben hin läuft die Schleimhautfalte ungefähr längs der in Fig. 4 sichtbaren Contourlinie des Knochens hin, immer schmal und sichelförmig bleibend, da hier die äussere Wand der Trommelhöhle dem Kopfe des Hammers überall sehr nahe bleibt. Endlich endet diese Schleimhautfalte oben auf dem Kopfe, und in ihrem Rande liegt das kurze rundliche Ligamentum Mallei superius, welches schräg nach aussen und abwärts gegen den Hammerkopf absteigt, und also ein Hemmungsband für nach aussen gerichtete Bewegungen desselben ist.

Nach unten hin verlängert sich das Ligamentum anterius von *l* aus durch zwei Schleimhautfalten, die eine läuft von der Wurzel des Processus Folianus gegen die Spitze *b* des kurzen Fortsatzes hin. Ihre gegenüberliegende Ansatzlinie liegt am Trommelfell. Es ist

dies die Falte, welche die vordere und hintere Trommelfelltasche von einander scheidet, so dass der Raum über dem Processus brevis *b* hauptsächlich der hinteren Tasche zufällt[1]). Die zweite Verlängerung des Ligamentum anterius nach unten ist eine schmale Falte mit freiem Rande, welche sich am unteren Rande von *l*, und diesen Fortsatz einhüllend, ebenfalls etwa längs der Contourlinie des Knochens in Fig. 4 bis zur Sehne des Trommelfellspanners hinabzieht. In der Figur ist dies die Stelle, wo die gestrichelte Linie von *b* die Contourlinie des Knochens schneidet. Diese letztgenannte Falte grenzt die vordere Tasche gegen die Paukenhöhle ab.

Von dem beschriebenen Zuge von Haftbändern und Schleimhautfalten, der in Fig. 4 von *b* bis *cp* immer längs der Contourlinie des Knochens verläuft, und bei *d* am kürzesten und stärksten ist, zweigt sich gerade hier bei *d* ein zweiter Bandzug ab, den ich das Ligamentum Mallei externum nennen will, welcher am Hammer von *d* längs einer stark hervorspringenden Knochenleiste entspringt, die bei *c* Fig. 4 ausläuft, und andrerseits sich an den scharfen Rand des Rivinischen Ausschnittes ansetzt, indem er nach hinten hin der Ansatzlinie der hinteren Trommelfelltasche folgt (also in Fig. 1 längs der Contourlinie der Zeichnung von *f* nach *c* läuft). Es besteht dieses Ligament aus einer Anzahl getrennter atlasglänzender Sehnenfasern, die von der kurzen Crista des Hammers zwischen *d* und *c* nach der viel breiteren und gekrümmten Ansatzlinie am Schläfenbein ausstrahlen.

In Fig. 5 ist dieser Bandzug von oben gesehen dargestellt; *eg* ist seine Ansatzlinie am Schläfenbein. Die Trommelhöhle war an diesem Präparate von oben geöffnet, und die obere äussere Wand derselben so weit weggemeisselt, dass man einen freien Einblick zwischen diese Wand und die ihr zugekehrte Fläche der Gehörknöchelchen gewonnen hat. Es ist *m* der Kopf des Hammers, *i* der Körper des Ambosses, *bi* die Spitze seines kurzen Fortsatzes, *Tu* der

---

1) Im Archiv für Ohrenheilkunde III. Bd. S. 255—266 hat Herr Dr. Prussack eine hiervon abweichende Beschreibung der Trommelfelltaschen gegeben. Der Raum über dem kurzen Fortsatze des Hammers soll eine besondere obere von der hinteren durch eine Scheidewand getrennte Tasche sein; ich habe eine solche nie finden können. Der angebliche Eingang in diese Tasche vorn oben am Kopf des Hammers führt in den Raum über dem Ligamentum Mallei externum, also nicht mehr zum Trommelfell.

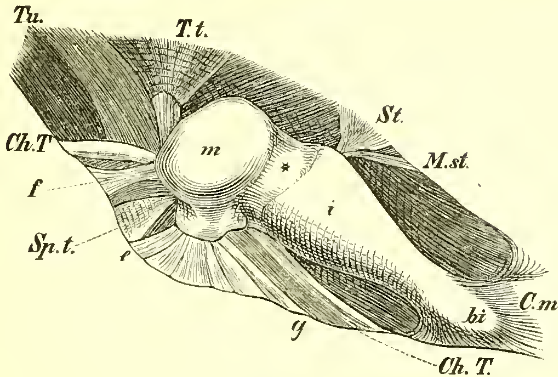


Fig. 5.

Zugang zur Tuba. In der Tiefe sieht man einen Theil des Steigbügels *St*, und die Sehne seines Muskels *M st*, ferner die Sehne des Trommelfellspanners und den Knochentrichter *T t* aus dem sie hervorkommt. *Ch T* ist die Chorda Tympani, die den freien Rand der die Taschen abgrenzenden Schleimhautfalten bezeichnet; *f* sind die oberen Sehnenzüge des Ligamentum Mallei anterius, die oberhalb der Spina tympanica major *Sp. t* entspringen. Die stark hervortretende Crista am Halse des Hammers, von welcher divergirend die Bündel des Ligamentum externum ausgehen, ist deutlich sichtbar.

Von diesen Bündeln ist das stärkste und am meisten gespannte das hinterste, was sich bei *g* ansetzt. Die Richtung desselben geht verlängert auf die Spitze der Spina hin, und dieser Strang ist es hauptsächlich, der die Drehungsaxe des Hammers darstellt. Ich möchte deshalb diesen hintersten Strängen des Ligamentum externum den besonderen Namen Ligamentum Mallei posticum beilegen, weil sie in der That in mechanischer Beziehung eine besondere Bedeutung haben. Man fühlt die straffe Spannung dieser Fasern sehr deutlich an einem Präparat mit unverletzten Verbindungen der Gehörknöchelchen, wenn man sie mit einer Stecknadelspitze betastet, während der Rand der Schleimhautfalte, in welchem die Chorda liegt, immer schlaff ist, und auch die vorderen Züge des Ligamentum externum bei *e* Fig. 5 nicht sehr straff sind, wenn nicht der Tensor Tympani angespannt, oder das Trommelfell nach aussen getrieben ist. Drückt man mit der Nadel stärker gegen die Stränge des Ligamentum posticum, so neigt sich der Hammer merklich. Beim Einwärtstreiben und Auswärtstreiben des Trommelfells sind es ferner gerade die Stränge des letztgenannten Bandes, die sich von allen

Befestigungen des Hammers am wenigsten bewegen. Woher die geringe Verschiebung kommt, die sie dann machen, wird sich später ergeben.

Denkt man sich die Richtung des Ligamentum posticum durch den Hammer hindurch verlängert, so trifft die Verlängerung auf die mittleren stärksten Züge des Ligamentum anterius, die von der Spina tympanica major ausgehen. Diese beiden Faserzüge zusammen, die zwar durch den Körper des Hammers von einander getrennt, doch in mechanischer Beziehung ein Band ausmachen, können wir das Axenband des Hammers nennen. Es genügt dieses Band, um den Hammer in seiner natürlichen Stellung festzuhalten, selbst wenn der Amboss vorsichtig von ihm gelöst ist. Ist die Spannung der Sehne des Trommelfellspanners noch erhalten, so ist seine Stellung sogar noch eine recht feste. In Fig. 4 ist die ungefähre Lage der Hammeraxe durch die gestrichelte Linie *a a* angegeben.

Die anderen im vorderen Theile des Ligamentum externum liegenden Faserzüge (Fig. 5 *e*) sind kürzere direct nach aussen gegen den Befestigungsrand des Trommelfells im Grunde des Rivinischen Ausschnitts gerichtete Stränge. Da sie oberhalb der Axe liegen, so wirken sie einer nach auswärts gegen den Gehörgang gerichteten Bewegung des Hammerstiels und des Trommelfells entgegen. Sie sind also wesentlich Hemmungsbänder der Drehung des Hammerstiels nach aussen. Man erkennt dies an passenden Präparaten, wie dem der Fig. 5, deutlich. Sie erschlaffen, so wie man das Trommelfell nach innen, oder den Hammerkopf nach aussen drängt. Sie lassen nur eine geringe Drehung des Hammerstiels nach aussen zu, selbst wenn man vorher die Sehne des Trommelfellspanners, das Steigbügelgelenk und das Ligamentum superius Mallei gelöst hat. Die Einziehung des Trommelfells wird vermehrt, so wie man die genannten Faserzüge mit einer stumpfen Nadelspitze von oben her drückt und dadurch spannt. Endlich ist auch noch zu bemerken, dass bei kräftigem Zuge des Trommelfellspanners, wobei der Stiel des Hammers durch das gespannte Trommelfell vor weiterer Einwärtstreibung bewahrt wird, die genannten Faserzüge des Ligamentum externum verhindern, dass das Axenband des Hammers über einen gewissen Grad hinaus nach aussen gezerrt werden könne; letzteres kann nämlich nur so weit geschehen, bis jene Stränge gespannt sind und man sieht sie deutlich sich spannen, wenn man den Versuch anstellt. Dann fällt

der Zug des Trommelfellspanners auf sie, und kann nicht mehr das Axenband angreifen.

Ebenso wie das Ligamentum externum das Axenband des Hammers gegen zu starke Zerrung nach innen schützt, so schützen die oberen und unteren Faserzüge des Ligamentum anterius das Axenband gegen zu starke Zerrungen nach oben oder nach unten. Wenn sich nämlich der Hammer mit seinem Kopf nach hinten, mit seinem Stiel nach vorn um seine Befestigung an der Spitze der Spina drehen wollte, so würden die oberen, bei der entgegengesetzten Drehung des Hammers die unteren Fasern des Ligamentum anterius gespannt werden. Daher kommt es auch, dass selbst wenn der Amboss gelöst ist, die bisher beschriebenen Bänder aber erhalten sind, der Hammer solchen Neigungen noch ziemlich gut widersteht, und in seiner natürlichen Lage ziemlich sicher steht. Die obersten Fasern des Ligamentum anterius treten übrigens, wie Fig. 5 bei *f* zeigt, in einer etwas nach einwärts gewendeten Richtung an den Hammerkopf, und spannen sich deshalb, wie das Ligamentum superius und externum bei Auswärtstreibung des Trommelfells.

Die Straffheit dieser Bandverbindungen wird nun im natürlichen Zustande noch erhöht durch die elastische Spannung des relativ starken Musculus Tensor Tympani, dessen Sehne sich an die vordere der Tuba zugekehrte Hälfte der medianwärts gekehrten Fläche des Hammers ansetzt, am Anfange des Handgriffs, ein wenig weiter nach unten, als auf der lateralen Seite der kurze Fortsatz herausragt. Fig. 9 zeigt die etwas schräg von vorn oben nach hinten unten gerichtete Ansatzlinie dieser Sehne. Der Muskel liegt bekanntlich in einem besonderen Knochencanal, der oberhalb der Eustachischen Röhre, durch welche die Trommelhöhle mit dem Schlunde communicirt, verläuft. Das entferntere Ende des Muskels entspringt noch ausserhalb dieses Kanals von der unteren Fläche des pyramidalen Theils des Felsenbeins und vom knorpeligen Theile der Eustachischen Röhre. Er geht dann durch den für ihn bestimmten Kanal, dessen gegen die Trommelhöhle geöffnetes Ende einen löffelförmigen Vorsprung bildet, um den sich die Sehne des Muskels umschlägt, um schliesslich quer durch die Trommelhöhle (*Tt.* Fig. 5) gegen die Ansatzstelle am Hammer zu verlaufen. Die Richtung der Sehne ist nahehin senkrecht gegen die Ebene, in der der Rand des Trommelfells liegt, so dass ihre Zugsrichtung nur wenig nach unten und nach vorn hin von dieser Normale abweicht. Dagegen

bildet sie einen ziemlich spitzen Winkel mit dem untern Theile des Hammerstiels und mit dem vorderen Theile seiner Drehungsaxe.

Der Tensor Tympani ist ein gefiederter Muskel; er entspringt von der Beinhaut der oberen Fläche des Knochencanals, in dem er liegt; seine Sehne liegt an seiner unteren Seite, und kehrt eine glatte freie Fläche gegen die glatte Beinhaut. Die Muskelfasern sind ziemlich kurz, und die Sehne greift deshalb bis in das untere Ende des Canals zurück. Die Röhre von Beinhaut, welche den Muskel einschneidet, verlängert sich auch über den frei durch die Trommelhöhle verlaufenden Theil der Sehne, äusserlich überzogen von der Schleimhaut der Trommelhöhle. Toynbee nennt diese Scheide des freien Sehnenstücks das Tensor-Ligament des Trommelfells. Die Isolirung der Sehne und ihrer Scheide von einander scheint aber bald mehr, bald weniger vollkommen zu sein, wenn man die Beschreibungen verschiedener Beobachter hierüber vergleicht; ich selbst habe an einem Präparate der hiesigen anatomischen Sammlung eine vollkommen glatte und unverwachsene Sehne innerhalb der Scheide gefunden, wie es Toynbee beschreibt; Henle dagegen hat Sehne und Scheide an mikroskopischen Schnitten durch ziemlich starke Bindegewebzüge mit einander verwachsen gesehen. Bei dem sehr geringen Spielraum der Hammerbewegungen ist eine ausgiebige Verschiebbarkeit der Sehne auch keineswegs nöthig.

Der Trommelfellspanner zieht den Handgriff des Hammers und mit ihm das Trommelfell nach innen, und spannt daher letzteres. Man kann diese Wirkung leicht an einem Präparate sehen, wo der Canal des Muskels und der Paukenhöhle von oben her geöffnet sind. Fasst man die sehnigen Stränge des Muskels noch innerhalb des Canals, und zieht sie an, so wird das Trommelfell gespannt. Da der Ansatz des Muskels nur wenig tiefer als das Axenband des Hammers liegt, so wird auch dieses dabei medianwärts gespannt, namentlich der hintere Theil desselben, das Ligamentum Mallei posticum, welches sich der Zugrichtung des Tensor Tympani am meisten nähert. Es wird die Stellung des Hammers eine sehr straffe, so wie die Sehne auch nur mässig gespannt ist. Man muss hierbei bedenken, dass ein schwacher Zug, der quer auf einen unausdehnsamen gespannten Strang ausgeübt wird, dessen Spannung sehr erheblich zu steigern im Stande ist, und dass die lebenden Muskeln auch im Ruhezustande als freilich sehr nachgiebige, aber doch immer schwach angespannte elastische Bänder zu betrachten

sind, welche Spannung durch active Contraction dann noch sehr beträchtlich gesteigert werden kann. Da übrigens der Trommelfellspanner wegen seines gefiederten Baus mechanisch äquivalent ist einem Muskel von viel grösserem Querschnitt und geringer Faserlänge, so werden wir auch ohne dass eine active Zusammenziehung desselben eintritt, seinen elastischen Zug als eine ziemlich erhebliche Kraft veranschlagen dürfen.

Auf diese Weise erklärt es sich, dass der Hammer, obgleich nur durch biegsame Bänder gehalten, doch, so lange seine natürlichen Befestigungen erhalten sind, selbst nach Lösung des Steigbügelgelenks nur eine sehr geringe Beweglichkeit hat, im Sinne einer Drehung um seine oben angegebene Drehungsaxe; dass er dagegen Versuchen, ihn in anderer Richtung zu verschieben, einen sehr erheblichen Widerstand entgegensetzt. Seine Axe ist festgestellt durch das Ligamentum anterius nach vorn, und den in dessen Masse liegenden Processus Folianus, und durch die hintersten Stränge des Ligamentum externum nach hinten, die wir als das Axenband des Hammers zusammengefasst haben. Dasselbe ist immerhin noch ziemlich straff gespannt, auch wenn die Sehne des Trommelfellspanners durchschnitten ist; so lange diese aber ihren Zug quer gegen das Achsenband ausübt, ist seine Spannung eine sehr straffe.

Der so befestigte Hammer besitzt dann ferner die beschriebenen Hemmungsbänder für Auswärtsdrehung des Handgriffs, welches ausser der Sehne des Trommelfellspanners noch sind 1) die mittleren und vorderen Fasern des Ligamentum externum, 2) das Ligamentum superius, 3) die oberen Fasern des Ligamentum anterius. Das Trommelfell selbst bildet ein Hemmungsband für stärkere Einwärtsdrehung des Hammerstiels.

So weit es die geringe Dehnbarkeit des Axenbandes und der oberen, beziehlich unteren Fasern des Ligamentum anterius zulassen würde, könnte sich der Kopf des Hammers auch nach vorn und hinten neigen, oder um eine senkrechte Axe drehen. Diese letzteren Bewegungen werden aber durch seine Verbindung mit dem Amboss noch weiter beschränkt. Doch werden wir sehen, dass die Bewegung des Hammers mit dem Amboss zusammen eine gewisse Nachgiebigkeit des Axenbandes erfordert.

§ 4.

Befestigung des Ambosses.

Der Körper des Amboss ist bekanntlich durch ein Gelenk mit dem Hammer verbunden. Sein längerer Fortsatz, den wir, um die häufige Wiederholung dieses schwerfälligen Namens zu vermeiden, als den Ambosstiel bezeichnen wollen, analog dem ihm parallel gerichteten Hammerstiel, reicht nach unten, und hat an seinem etwas medianwärts gekrümmten Ende eine kleine Gelenkfläche für den Steigbügel. Der andere kurze Fortsatz sieht nach hinten, und ruht mit seiner Spitze, die an ihrer unteren Kante eine unvollkommen ausgebildete kleine Gelenkfläche trägt, in einem thalförmigen Einschnitt der knöchernen Wand der Trommelhöhle, wo diese nach hinten in die Zellen des Zitzenfortsatzes sich verlängert. Die Kapsel dieses Gelenks hat namentlich an der oberen Seite starke Sehnenfasern, die wie Fig. 5 bei *bi* zeigt, von dem kurzen Fortsatze des Amboss theils medianwärts, theils lateralwärts nach hinten ziehen. In derselben Figur ist *i* der Körper des Ambosses, und * das Kapselband für das Hammer-Ambossgelenk.

Die Form dieser letzteren Gelenkfläche wird gewöhnlich als eine sattelförmige beschrieben, nur ist zu bemerken, dass sowohl die concave, wie die convexe Krümmung dieses Sattels, einer scharfen Kante, in der zwei fast ebene Flächen zusammenstossen, sehr nahe kommt. Um die mechanische Wirkung dieses Gelenks anschaulich zu machen, geht man, glaube ich, besser von einem andern Vergleiche aus, als von dem mit einer Sattelfläche. Es ist nämlich ein Gelenk, wie sie an Uhrschlüsseln gebräuchlich sind, an denen der Griff in einer Richtung nicht gedreht werden kann, ohne die Stahlhülse mitzunehmen, in entgegengesetzter Richtung dagegen unter mässigem Widerstand zurückgedreht werden kann. Ebenso wie ein solches Uhrschlüsselgelenk erlaubt das Gelenk zwischen Hammer und Amboss eine, freilich nur kleine, Drehung um eine quer durch den Kopf des Hammers gegen den kurzen Fortsatz des Ambosses hinlaufende Axe, welcher Drehung für die Einwärtstreibung des Hammerstiels sich ein Paar von Sperrzähnen entgegensetzen; während der Hammerstiel andrerseits nach auswärts getrieben werden kann, ohne den Amboss mitzunehmen.

Wenn ein solches Gelenk aus Metall gemacht werden soll, so wendet man Schraubenflächen an. Ein hohler Cylinder, abgeschnitten,

wie A Fig. 6, auf welchen das in punktirten Linien angedeutete Stück B passte, würde die normale Form eines solchen Gelenks darstellen. Es ist klar, dass A und B in dem Sinne der beiden Pfeile gegen einander gedreht, mit ihren beiden Sperrzähnen a und b aufeinanderstossen müssen, und eine solche Drehung dann nothwendig gehemmt ist, während die entgegengesetzte Drehung mit einer langsam wachsenden Entfernung der Cylinder von einander frei ist. Der Mechaniker, der ein solches Gelenk ausführt, macht den Cylinder hohl, weil nahe an der Axe die Schraubenfläche, wie der innere Rand einer Wendeltreppe, eine schwer auszuführende steile Steigung bekommen würde. Die Gelenkenden der Knochen, welche mit elastisch nachgiebigen Knorpelschichten überzogen sind, und deren Lücken durch den quellenden Knorpel leicht ausgefüllt werden, zeigen die entsprechenden geometrischen Formen meist nur in einer annähernden Nachbildung mit abgerundeten Kanten, u. s. w. Die Umfangslinie des Hammerambossgelenks ist keine regelmässig gebildete Schraubenlinie. Denken wir sie uns von dem cylindrischen Umfange des Gelenks auf eine Ebene abgewickelt, so würde sie etwa die Form der Fig. 7 haben, so dass die Enden $a_0\, a_1$ zusammenschliessen. Ferner tritt gegen die Axe des Gelenks nicht die Bildung einer vollkommenen Schraubenfläche, wie die einer Wendeltreppe ein, sondern mehr die einer Kegelfläche. Man denke sich von einem Punkte der Axe des Cylinders gerade Linien nach allen Punkten der wie $a_0\, a_1$ verlaufenden Umfangslinie gezogen, so erhält man ungefähr die Form der betreffenden Gelenkfläche. Und zwar muss man für den Hammer die Spitze des so entstehenden Kegels etwas tiefer legen, als den geraden Theil der Umfangslinie $b_0\, a_0\, a_1\, b_1$, so dass der hierher gerichtete Theil der

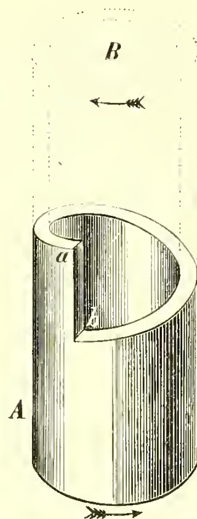


Fig. 6.

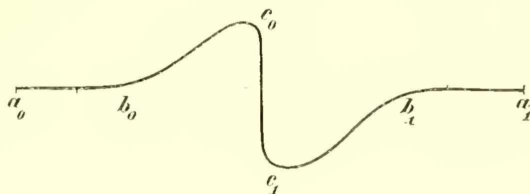


Fig. 7.

Kegelfläche am Hammer concav wird, am Amboss dagegen convex. Ein solches Gelenk wird dann aus vier beinahe ebenen Flächen bestehen, die in seinem Mittelpunkte zusammenstossen und am Rande die Kanten 1) $c_0 c_1$, 2) $c_0 b_0$, 3) $c_1 b_1$, 4) $b_0 a_0 a_1 b_1$ zeigen, und die nach oben gekehrte Fläche des Gelenks, wird wie ein sattelförmiges zwei ausspringende Kanten zeigen, nämlich die von c_0 und b_1 ausgehen, und zwei einspringende, die von b_0 und c_1.

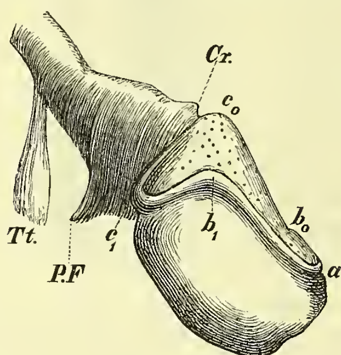


Fig. 8.

In Fig. 8 ist der Hammer dargestellt, von oben und innen gesehen. Die Buchstaben $a\, b_0\, c_0\, b_1\, c_1$ haben dieselbe Bedeutung, wie in Fig. 7. Der platte Theil der Gelenkfläche ist gerade in Verkürzung gesehen. *P.F.* ist der Stumpf des Processus Folianus, *Cr.* der Anfang der Knochenleiste, von der das Lig. Mallei posticum entspringt. *T.t.* die Sehne des Tensor Tympani. Wie man sieht, liegt hier am Hammer-Ambossgelenk der Punkt $a_0 a_1$ an der oberen Seite des Gelenks, die Stosskante der Sperrzähne $c_0 c_1$ dagegen unten zwischen dem Hammerstiel und dem langen Fortsatze des Amboss; der Sperrzahn c_0 des Hammers liegt an der dem Trommelfell zugekehrten lateralen Seite des Gelenks, der des Ambosses auf der medialen Seite. Einwärtstreibung des Hammerstiels ist also nicht möglich, ohne den Amboss mitzunehmen; Auswärtstreibung desselben aber hat so viel Spielraum, als die Bänder und der Knorpelüberzug der Gelenkflächen eben gewähren.

Der Punkt $a_0 a_1$ liegt in den Gelenkflächen beider Knochen weiter von der Axe, als die Sperrkante $c_0 c_1$, so dass der beinahe ebene Theil der Flächen stärker ausgebildet ist, als es die Flächen der Sperrzähne sind; und dem entsprechend ist die ganze Fläche des Gelenks elliptisch, mit längerer verticaler Axe. Ferner ist zu bemerken, dass die Spitze der von uns als Typus des Gelenks angenommenen Kegelfläche nicht scharf ausgebildet, sondern sattelförmig abgerundet ist.

Eine Kegelfläche, wie die mittels der Fig. 7 zu construirende, kann sich nun allerdings nicht mit vollständiger Deckung in sich selbst verschieben, denn wenn die beiden Stücke von Schraubenlinien

$b_0 c_0$ und $b_1 c_1$ am Umfang des Gelenks auf einander gleiten, muss die Mitte des Gelenks und der ebenere Theil sich von einander entfernen, während die beiden Knochen sich nur mit den beiden genannten Schraubenlinien auf einander stützen. Am frischen Gelenk kann aber bei dem überhaupt sehr geringen Spielraume der betreffenden Bewegung dieser Zwischenraum durch den quellenden Knorpel vollständig ausgefüllt werden.

Die beschriebene Wirkung des Gelenks lässt sich auch an getrockneten Gehörknöchelchen vollkommen gut wahrnehmen, wenn man an den Hammer oberhalb und in Richtung seines Processus Folianus, an den Amboss dagegen an der Spitze und in Richtung seines Processus brevis Schwefelhölzchen als Handgriffe mit Siegellack befestigt, die Knochen dann mit ihren Gelenkflächen an einander legt, und nun das am Hammer befestigte Hölzchen dreht, während man das andere mit leichter Reibung festhält. Dreht man den Hammer in der Richtung: Kopf, kurzer Fortsatz, Stiel, so fasst er den Amboss vollkommen fest und sicher und nimmt ihn mit. Dreht man rückwärts, so lösen sich die Gelenkflächen sogleich von einander und der Amboss bleibt stehen.

Die Peripherie der beiden Gelenkflächen ist durch ein Kapselband an einander geheftet, welches sich in rinnenförmige Einschnitte der Knochen ringsum einsetzt. Das Kapselband ist nicht sehr fest, es zerreisst bei verhältnissmässig ziemlich geringen Zerrungen der Knochen. Relativ am festesten sind noch die Faserstreifen, welche vom Sperrzahn des Hammers ausgehen; hier gehen auch einige Fasern des Ligamentum externum des Hammers an den Amboss über.

Die Excursionsweite des Hammer-Ambossgelenks beträgt an dem unteren Ende des langen Fortsatzes des Amboss etwa nur ein halbes Mm. und da dieser Punkt von dem Drehpunkte des Gelenks etwa 6 Mm. absteht, so beträgt die Drehung beider Knochen gegen einander noch nicht 5 Grad.

So lange Hammer und Amboss noch in ihrer natürlichen Verbindung mit einander und mit dem Felsenbein sind, der Amboss aber vom Steigbügel getrennt, so können sie mit einander Bewegungen ausführen, bei denen Hammerstiel und Ambosstiel mit dem Paukenfell gleichzeitig nach innen oder nach aussen gehen. Der Hammer allein genommen würde sich dabei um sein Axenband als Axe drehen; durch die Verbindung mit dem Amboss wird seine Drehung etwas verändert. Die Befestigung des kurzen Fortsatzes

des Ambosses *b c* Fig. 5 liegt nämlich ziemlich beträchtlich nach innen von dem verlängerten Axenbande des Hammers. Bei einer reinen Drehung um eine feste Axe können aber nur die Punkte der Drehungsaxe selbst in Ruhe bleiben, kein anderer. Es kann ferner die Entfernung der ausser der Drehungsaxe liegenden einzelnen Punkte des gedrehten Körpers von einem äussern festen Punkte (hier dem Befestigungspunkte des kurzen Fortsatzes des Amboss) bei der Drehung nicht unverändert bleiben; ausgenommen sind hiervon für unendlich kleine Drehungen nur diejenigen Punkte des gedrehten Körpers, die in der durch die Drehungsachse und den äusseren festen Punkt gelegten Ebene liegen. Letzteres ist beim Hammerkopfe nicht der Fall. Der Hammerkopf, der über der Drehungsaxe liegt, muss sich bei der Einwärtsdrehung des Hammerstiels von dem Befestigungspunkte des kurzen Ambossfortsatzes entfernen. Da nun aber der Amboss mit ziemlich kurzen, wenig nachgiebigen Bändern zwischen dem Hammerkopf und dem genannten Befestigungspunkte ausgespannt ist, und deren Entfernung unveränderlich erhält, so muss der Hammer, indem sein Stiel sich nach innen bewegt, gleichzeitig auch eine kleine Neigung mit seinem Kopfe nach hinten gegen den Amboss hin, mit seinem Stiele nach vorn hin machen. Dass eine solche Neigung in der That erfolgt, erkennt man an der Spannung, die man bei der genannten Bewegung im Kapselbande an der obern Seite des Hammer-Ambossgelenks in den, obersten Strängen des Ligamentum Mallei anterius und an den sehnigen Verstärkungsbändern des Amboss-Paukengelenks eintreten sieht. Man sieht die beiden Kapselbänder unter der Loupe in der That sich deutlich straffer anspannen, sobald man mit einem Nadelknopf das Trommelfell nach innen drängt. Wenn man ferner unter diesen Umständen mit einer Nadel auf den kurzen Fortsatz des Ambosses von oben drückt, so fühlt und sieht man, dass dieser nicht auf dem Boden der thalartigen engen Rinne aufliegt, in die sich seine Spitze einschiebt, sondern diesem Boden noch merklich genähert werden kann, wobei dann die oberen atlasglänzenden Verstärkungsbänder des Gelenks erschlaffen und sich falten. Dagegen liegt die Spitze des kurzen Amboss-Fortsatzes der auf ihrer äussern Seite sich erhebenden Wand der Trommelhöhle an, und stützt sich auf diese nach aussen hin, während sie von oben nach unten ein wenig gleiten kann. Der Amboss wird also vom Hammer gleichsam frei in der Luft schwebend getragen, so dass sich bei normaler Stellung seine

Spitze nur nach aussen hin an Knochen anlegt. Drängt man aber Hammergriff und Trommelfell nach aussen, so gleitet die Spitze des kurzen Fortsatzes des Amboss etwas nach abwärts, und ruht dann mit ihrer untern Seite in dem Boden der thalartigen Grube ihres Gelenks.

Es muss nun auch eine kleine Verschiebung des Ambosses gegen den Hammer bei dieser Befestigung eintreten, sobald der Hammerstiel nach innen getrieben wird. Man denke einen Augenblick den Amboss fest mit dem Hammer verbunden und letzteren um sein Axenband gedreht, so wird die Spitze des kurzen Ambossfortsatzes, die vor dem Axenband liegt, bei Einwärtsbewegung des Trommelfells gehoben werden. Um jene Spitze ihrer Befestigungsstelle wieder zu nähern, muss der Amboss gegen den Hammer eine Drehung ausführen, wodurch die Spitze des kurzen Fortsatzes gesenkt wird. Eine kleine Bewegung dieser Art ist wegen der sattelförmigen Gestalt des Hammer-Ambossgelenks möglich. Gleichzeitig nähert sich der Ambossstiel etwas dem Hammerstiel. Auch diese letztere Bewegung erkennt man an den Präparaten, wo das Ambosssteigbügelgelenk gelöst, die übrigen Verbindungen aber noch erhalten sind. Dies ist nun aber auch gerade die Stellung der beiden Knochen, wie man aus Fig. 8 erkennen kann, wo die unteren mit den Sperrzähnen bewaffneten Theile der Gelenkflächen sich an einander drängen. Letzteres fühlt man deutlich, wenn man bei dem beschriebenen Versuche mit den trocknen Knöchelchen die Stellungen sucht, wo sie sich am festesten packen.

Eine andere kleine Verschiebung des Hammers wird ferner durch diese Verbindung bewirkt. Wenn er sich mit seinem Kopfe gegen den Amboss zu neigen muss, so kann er dies nicht, ohne das Achsenband etwas aus der geraden Richtung zu bringen. Die vordere Seite des Halses mit dem Processus Folianus und dem Ligamentum anterius würde sich heben müssen, und die hintere Seite des Halses mit den hinteren Strängen des Ligamentum externum würde sich senken müssen. Ersteres wird kaum erfolgen können, da dicht über dem Processus Folianus die Spina tympanica posterior liegt, an welche ersterer von unten her anstossen würde. Desto entschiedener wird also Senkung der hinteren Seite des Halses, und somit des ganzen Hammers erfolgen müssen, wobei die Fasern des Lygamentum Mallei posticum, die vom Hammer aus nach hinten und etwas nach oben gerichtet sind, stärker gespannt werden müssen.

Es stimmen diese Ueberlegungen mit einer kürzlich von Politzer[1]) veröffentlichten Mittheilung. Derselbe hatte Glasfäden als Fühlhebel an die Gehörknöchelchen befestigt, um dadurch die Drehungsaxen der einzelnen Knöchelchen genauer bestimmen zu können. Er setzte das Trommelfell durch Luftdruck vom Gehörgang aus in Bewegung. Er fand, dass die Axe des Hammers durch die Wurzel des Processus Folianus geht, die des Ambosses durch die Spitze des kurzen Fortsatzes, dass beide Axen aber nicht fest, sondern beweglich seien.

Die kleinen Veränderungen in der Axendrehung des Hammers, welche durch die besondere Befestigungsweise des Ambosses hervorgebracht werden, scheinen mir namentlich noch darauf einen wichtigen Einfluss zu haben, dass der Nabel des Trommelfells immer in einer gegen die Ansatzebene dieser Membran normalen Richtung bewegt wird. Da nämlich das Axenband des Hammers schräg gerichtet ist gegen die Ansatzebene des Trommelfells, so würde jede Einwärtsbewegung des Hammerstiels auch den Nabel des Trommelfells etwas nach hinten verschieben. Nun wird aber gleichzeitig durch den Amboss der Kopf des Hammers nach hinten gezogen und dadurch erhält der Handgriff eine entgegengesetzte Bewegung nach vorn.

Da ferner der Nabel des Trommelfells von der Ansatzebene dieser Membran entfernter liegt, als die Drehungsaxe des Hammers (ausgenommen höchstens deren vorderstes Ende an der Spina Tympanica), so würde jede Einwärtsbewegung des Hammerstiels den Nabel des Trommelfells auch etwas nach oben (das heisst in Richtung nach dem Hammerkopfe hin) verschieben. Dem wird entgegengewirkt dadurch, dass der Hammer im Ganzen bei der betreffenden Bewegung durch den Amboss etwas nach abwärts gezogen wird, wie wir eben erörtert haben.

Es werden also beide Abweichungen der Bewegung des Trommelfellnabels corrigirt, und so bleibt nur die Bewegung desselben, welche senkrecht zur Ansatzebene der genannten Membran geschieht, übrig.

Gleichzeitig ist ersichtlich, dass auch der kurze Fortsatz des Hammers bei diesen Verschiebungen ein wenig am Trommelfell

---

1) Wochenblatt der K. K. Gesellschaft der Aerzte. Wien 1868. Januar 8.

gleiten muss, was durch die von J. Gruber beschriebene eigenthümliche Verbindung beider Theile möglich gemacht wird.

Ferner möchte ich noch darauf aufmerksam machen, dass der Zug des Spannmuskels des Trommelfells gleichzeitig alle diese Bänder, welche die Gehörknöchelchen in ihrer Lage sichern, straff anspannt. Er zieht zunächst den Hammerstiel nach innen und mit ihm das Trommelfell. Gleichzeitig aber wirkt sein Zug auch auf das Axenband des Hammers, welches er nach innen zieht und anstrafft. Dabei wird ferner, wie wir gezeigt haben, der Hammerkopf vom Ambosspaukengelenk entfernt, und die Haftbänder des Amboss sowohl gegen den Hammer hin, wie an der Spitze seines kurzen Fortsatzes werden gespannt, letzterer vom Knochen abgehoben. Der Amboss kommt dabei in die Lage, wo die Sperrzähne des Hammerambossgelenks am festesten in einander greifen. Endlich wird sein langer Fortsatz gezwungen die Einwärtsdrehung des Hammerstiels mitzumachen, und dieser drückt nun, wie wir weiter sehen werden auf den Steigbügel und drängt diesen in das ovale Fenster ein gegen das Labyrinthwasser.

In dieser Beziehung ist die Construction des Ohres sehr merkwürdig; durch den Zug der einen elastischen Fasermasse des Trommelfellspanners, dessen Spannung überdies veränderlich ist und den Bedürfnissen angepasst werden kann, werden alle die unelastischen sehnigen Befestigungsbänder der Gehörknöchelchen gleichzeitig in straffe Spannung gesetzt.

Erschlafft wird dadurch nur das Ligamentum Mallei superius, welches wesentlich in demselben Sinne, wie die Sehne des Spannmuskels wirkt.

Daher steht auch an einem frisch präparirten Gehörorgan, an dem die Todtenstarre des Tensor Tympani noch nachwirkt, alles in der Paukenhöhle so straff und fest, während man später, wenn man die einzelnen Theile auseinander nimmt, fast alle einzelnen Verbindungs- und Befestigungsbänder der Gehörknöchelchen schlaff und schlackerig findet, so dass man ohne genaue Untersuchung dieser Verhältnisse gar nicht begreifen kann, wie beides mit einander zu vereinigen ist[1]).

---

1) Betreffs der Gelegenheiten, bei denen sich der Tensor Tympani zusammenzieht, möchte ich hier die kürzlich von Politzer veröffentlichte Beobachtung bestätigen, dass dies beim Gähnen geschieht. Ich hatte schon,

§. 5.
Die Bewegungen des Steigbügels.

Das Amboss-Steigbügelgelenk hat die Gestalt eines flachen Kugelabschnitts, der convex gegen den Steigbügel ist. Die Kapsel ist zart, mehr mit elastischen Fasern durchwebt, als die der beiden andern Gelenke. Auf ihrer untern Seite sind festere Fasern, die, wenn der Amboss aufwärts gezogen wird, sich spannen und den Steigbügel mitnehmen, bei der entgegengesetzten Bewegung aber sich zusammenfalten, so dass der Steigbügel dieser nicht so unbedingt folgt.

Die Basis des Steigbügels ist von einer elastischen faserknorpeligen Lippe umgeben, wie sie ähnlich als Lippen der Gelenkpfannen auch an grösseren Gelenken vorkommen; diese hat eine Breite von 0,7 Mm. Die Verbindung zwischen Steigbügelbasis und Labyrinthwand scheint nur durch die Knochenhaut des Vorhofs hergestellt zu werden, die sich auch über die Basis des Steigbügels fortsetzt. (Henle.) Die fibröse Lippe des Steigbügels ist nicht an den Rand des ovalen Fensters angeheftet. Auf der äussern Seite überzieht auch noch die Schleimhaut der Paukenhöhle das Gelenk. Die Einheftung der Steigbügelbasis an ihrer unteren Seite, längs des geraderen Randes der Basis ist etwas straffer als an der oberen Seite; am festesten ist sie am hinteren Ende. Drängt man daher mit einem von der Seite des Vorhofs aufgesetzten Nadelknopf die Basis des Steigbügels nach aussen, so macht derselbe, auch nachdem er vom Amboss gelöst ist, gleichzeitig eine Hebelbewegung, wodurch sich sein Köpfchen nach unten und hinten verschiebt; stösst man eine feine Nähnadel in die Basis ein, die als Fühlhebel dient,

---

ehe ich seine Versuche kannte, bemerkt, dass wenn ich beim Gähnen die Kieferbewegungen zu unterdrücken suche, ich zuerst das bekannte Knacken höre, welches die Eröffnung der Tuba anzeigt. Dann tritt bei mir auf dem Gipfel des Gähnens mit dem Gefühl der Spannung im Ohr ein heftiges Muskelgeräusch ein, wie ich es sonst bei offenen Gehörgängen nie, und kaum so stark bei verschlossenen Ohren und den kräftigsten Zusammenziehungen der Kaumuskeln höre. Gleichzeitig tritt eine sehr starke Dämpfung der von aussen kommenden Töne ein. Ich schloss daraus, dass ein Muskel in Contraction gesetzt sein müsse, dessen Oscillationen sehr viel vollkommener auf das Gehörorgan übertragen werden, als die aller andern, nämlich der Tensor Tympani.

so sieht man an dieser die Hebelbewegung noch besser. Die Beweglichkeit der Steigbügelbasis ist übrigens eine sehr geringe.

Ich habe sie theils direct bestimmt, theils aus der Bewegung des Labyrinthwassers berechnet. Zur directen Bestimmung wurde an einem Präparat, dessen Trommelhöhle und Vorhof von oben geöffnet waren, eine sehr feine Nähnadel mit der Spitze in die Membrana obturatoria des Steigbügels eingestossen, nahe dem vorderen Bogenschenkel. Das Präparat wurde dann so gewendet, dass die Basis des Steigbügels nach unten sah, und in dieser Stellung in einem Schraubstock befestigt. Die Nadel hatte als zweiten Unterstützungspunkt den scharfen Schnittrand des zwischen Trommelhöhle und Labyrinth stehen gebliebenen Restes der knöchernen Wand. Diese Stelle, 3,8 Mm. von der im Ligamentum obturatorium steckenden Spitze der Nadel entfernt, diente als Drehpunkt für ihre Hebelbewegungen. Der frei horizontal heraussehende Rest der Nadel bildete den zweiten längeren Hebelarm, von 23 Mm. Länge. Die Spitze dieses längeren Arms bewegte sich 0,20 Mm. auf und ab, wenn man mit einem gegen die Basis des Steigbügels gesetzten Nadelknopf, diesen aus- und eintrieb; und 0,15 Mm., wenn man dasselbe dadurch that, dass man Luft in den äussern Gehörgang bald eintrieb, bald auszog, wobei die Bewegung des Trommelfells durch die andern Gehörknöchelchen auf den Steigbügel übertragen wurde. Da nun die Bewegungen des Steigbügels an dem freien Ende der Nadel um $\frac{23}{3,8}$ vergrössert erschienen, so betragen in diesen Fällen die Verschiebungen des Steigbügels selbst nur 0,033 und 0,025 Mm. Nach häufigerer Wiederholung der Versuche, wodurch die Bänder aber wohl gedehnt waren, wuchs die Verschieblichkeit auf 0,056 Mm.

An einem andern Präparate war nach dem Vorgange von Politzer nur der obere Bogengang des Labyrinths von der oberen Seite des Schläfenbeins her geöffnet und ein dünn ausgezogenes Glasröhrchen eingesetzt worden, dessen Querschnitt durch Calibrirung mit Quecksilber gleich 0,228 Quadratmillimeter gefunden war. Der Vorhof und ein Theil des Röhrchens waren mit Wasser gefüllt [1]).

1) Um es luftdicht einzukitten hatte ich erst den Knochen mit Fliesspapier äusserlich möglichst getrocknet, dann die Mündung des Bogengangs mit einem glühenden Eisendraht berührt, und auf die trockene verbrannte Stelle sogleich einen Tropfen erwärmten Wachsharzkitts gebracht; in letzterm wurde das Glasröhrchen befestigt und eingeschmolzen, schliesslich

Bewegungen der Gehörknöchelchen durch Eintreiben von Luft in den äusseren Gehörgang hervorgerufen, bewirkten, dass die Flüssigkeit in jenem Röhrchen um 0,9 Mm. stieg. Da nun die Durchmesser der Fenestra ovalis sich fanden gleich 1,2 und 3 Mm., so ist die Fläche der Fenestra ovalis etwa 12,4mal so gross, als der Querschnitt des Glasröhrchens. Die mittlere Excursionsweite der Steigbügelbasis mus also $\frac{1}{12,4}$ von der der Flüssigkeit im Röhrchen sein, was 0,0726 Mm. ergiebt. Die grössten Werthe für die Excursionen des Steigbügels, die wir gefunden haben, sind also $\frac{1}{18}$ und $\frac{1}{14}$ Mm.

Das Verhältniss des Steigbügels zum Amboss ist so, dass wenn der Hammerstiel einwärts gezogen ist, der lange Fortsatz des Ambosses fest gegen das Knöpfchen des Steigbügels drückt, auch wenn das Kapselband zwischen beiden durchschnitten ist. Bewegt man den Hammerstiel nach aussen, soweit es die Hemmungsbänder des Hammers zulassen, so entfernt sich dagegen bei durchschnittenem Kapselbande der lange Fortsatz des Ambosses um $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{2}$ Mm. vom Steigbügel. Drückt man bei dieser Stellung des Hammers den Ambossstiel wieder gegen den Steigbügel an, so bleibt er so stehen ohne zurückzuspringen; es lösen sich hierbei die Sperrzähne des Hammerambossgelenks von einander, und es ist keine hinreichend grosse Kraft da, die den Amboss zurückzöge. Bei erhaltenem Amboss-Steigbügelgelenk bleibt natürlich die Spitze des Ambossstiels immer am Steigbügel haften; aber aus den eben beschriebenen Thatsachen folgt, dass bei herausgetriebenem Hammerstiel der Amboss keinen Zug auf den Steigbügel ausübt, da ja selbst bei gelöstem Gelenk, der Ambossstiel am Steigbügel stehen bleiben kann, ohne mit dem Hammerstiel nach aussen gezogen zu werden.

Diese Anordnung hat offenbar den wichtigen Erfolg, dass durch Vermehrung des Drucks in der Trommelhöhle oder Verminderung desselben im Gehörgange das Trommelfell mit dem Hammer beträchtlich nach aussen getrieben werden kann, ohne dass der Steigbügel in Gefahr kommt, aus dem ovalen Fenster ausgerissen zu werden. Für die umgekehrte Bewegung des Hammers nach innen bildet das Trommelfell selbst ein sehr kräftiges Hemmungsband.

---

das ganze Präparat in eine Schaale mit Wasser gebracht, so dass die Spitze des Glasröhrchens eintauchte, und nun unter die Luftpumpe gestellt. Machte man den Raum luftleer, so entwich die in den Vorhof eingedrungene Luft durch das Röhrchen; nachher drang Wasser dafür ein.

Da die Spitze des langen Fortsatzes des Ambosses vom Axenbande des Hammers aus gesehen noch mehr nach hinten gerichtet steht, als die Spitze des Hammerstiels, so steigt sie bei der Einwärtsbewegung noch mehr als die letztere, und diese Steigung wird durch die kleine Senkung des Hammers, die vorher beschrieben ist, nicht ganz compensirt. Einwärtstreibung des Trommelfells bewirkt also, dass auch die Spitze des Ambossstiels einwärts getrieben und gleichzeitig ein wenig gehoben wird. Das stimmt mit der entsprechenden Bewegung des Steigbügels überein, dessen Knöpfchen sich ebenfalls ein wenig hebt, wenn er nach einwärts getrieben wird, in Folge der oben beschriebenen ungleichen Befestigung desselben am obern und untern Rande des ovalen Fensters. Diese Hebelbewegung des Steigbügels ist auch von Henke[1]), Lucae[2]) und Politzer[3]) schon bemerkt und beschrieben worden. Gegen ersteren muss ich nur bemerken, dass die Hebelbewegung des Steigbügels keineswegs die einzige desselben ist, dass nicht etwa der eine Rand der Steigbügelplatte einwärts bewegt wird, während der andere sich nach aussen bewegt. Man kann vielmehr bei der Beobachtung der Steigbügelbasis vom Vorhof aus erkennen, dass immer beide Ränder gleichzeitig ein und ausgetrieben werden, nur der obere mehr, der untere weniger.

Die Widersprüche, welche sich scheinbar zwischen den Beobachtungen der Herren Lucae und Politzer finden über die Wirkung, welche Steigerung des Luftdrucks in der Trommelhöhle auf den Steigbügel und das Labyrinth hat, möchten sich ebenfalls daraus erklären, dass Herr Lucae die Hebelbewegung des Steigbügels beobachtet hat, Herr Politzer die vom Eintreiben des Steigbügels abhängige Schwankung des Labyrinthwassers. Beides geht nicht nothwendig immer in gleichem Maasse vor, namentlich in diesem Falle nicht, weil der Luftdruck auch durch das runde Fenster den Druck im Labyrinth steigern kann.

§ 6.

Zusammenwirken der Gehörknöchelchen.

Denkt man sich Hammer und Amboss so aneinandergelegt,

1) Der Mechanismus der Gehörknöchelchen in der Zeitschrift für rationelle Medicin 1868.

2) Archiv für Ohrenheilkunde. IV. S. 36—37.

3) Wochenblatt der K. K. Gesellschaft der Aerzte. Wien 1868.

dass ihre Sperrzähne sich an einander klemmen, und beide sich als ein zusammenhängender fester Körper bewegen, dabei einen Druck einwirkend auf die Spitze des Hammergriffs, der diesen nach innen treibt und dann vom Amboss auf den Steigbügel übertragen wird, so kann man das System der beiden Knöchelchen als einen einarmigen Hebel betrachten, dessen Hypomochlion da liegt, wo die Spitze des kurzen Fortsatzes des Amboss sich nach aussen hin gegen die Wand der Trommelhöhle anstemmt. Die Spitze des Hammerhandgriffs stellt den Angriffspunkt der Kraft dar, die Spitze des Ambossstiels den Punkt, der auf die Last wirkt. Diese drei Punkte liegen in der That sehr nahe in einer geraden Linie, so dass sich das Amboss-Steigbügel-Gelenk nur ganz wenig nach innen zu von der geraden Verbindungslinie der Spitze des Hammerstiels und der äusseren Seite des Amboss-Pauken-Gelenks entfernt. Man kann sich davon an Präparaten, wo die natürlichen Verbindungen der Knöchelchen noch erhalten sind, leicht überzeugen. Fig. 9 stellt die beiden Knöchelchen in der Lage, wo ihre Sperrzähne an einander schliessen, von der Paukenhöhlenseite aus gesehen, dar; *aa* ist die durch die genannten drei Punkte gezogene gerade Linie; *P. F.* der Stumpf des Processus Folianus, *T. t.* die Sehne des Trommelfellspanners; bei *b* erscheint der Sperrzahn des Amboss. An dem dargestellten Präparate habe ich die ganze Länge dieses Hebels zu $9^1/_2$ Mm. gefunden, den kürzeren Arm zwischen den beiden Spitzen des Amboss zu $6^1/_3$, so dass derselbe gerade zwei Drittheile des längeren beträgt.

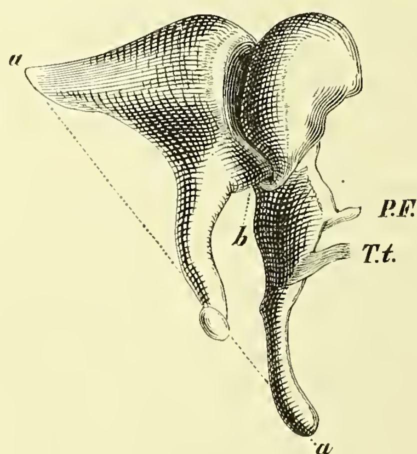


Fig. 9.

Daraus folgt, dass wenn Hammer und Amboss fest gegen einander liegen, die Excursion der Spitze des Ambossstiels nur $\frac{2}{3}$ von der des Hammerstiels betragen wird; die Grösse des Druckes aber, den jener auf den Steigbügel ausübt, $1\frac{1}{2}$ Mal so gross sein wird, als die Kraft, welche gegen die Spitze des Hammerstiels wirkt.

Da die drei in Betracht kommenden Punkte dieses Hebels in gerader Linie liegen, so ist dieser Druck ganz unabhängig von der Lage der übrigen Theile der Knöchelchen, vorausgesetzt nur, dass diese eine solche Stellung behalten, in der sich die Gelenkflächen fest zusammenstemmen.

Dies letztere wird nun dadurch erreicht, dass bei Einwärtstreibung des Trommelfells, indem sich der Hammer, wie oben erwähnt, um eine schräg (etwa um 30 Grad) gegen die Ansatzebene des Trommelfells geneigte Axe dreht, und seinen Kopf vom Amboss-Pauken-Gelenk entfernt, er das Kapselband des Hammer-Amboss-Gelenks spannt. Da nun jeder Versuch, die Knochen gegen einander in dem Sinne zu drehen, dass die Sperrzähne gegen einander gedrängt werden, sogleich eine erhebliche Klaffung zwischen den Gelenkflächen hervorbringt, so widerstehen die schon gestreckten Fasern des Kapselbandes einer solchen hinreichend kräftig.

Umgekehrt, wenn das Trommelfell auswärts getrieben wird, erschlafft die Kapselmembran des Hammer-Amboss-Gelenks und erhält nun so viel Nachgiebigkeit, dass sie das kleine Auseinanderweichen der Gelenkflächen zulässt, wie es eine Bewegung, die die Sperrzähne aus einander treibt, erfordert.

Die übrigen Verschiebungen, die das Hammer-Amboss-Gelenk als ein unvollkommen sattelförmiges Gelenk leicht zulässt, lassen die genannten drei Punkte des Hebels nicht aus der geraden Linie heraustreten. Die eine Drehungsaxe des Sattelgelenks geht durch die Spitze des Hammerstiels, die zweite steht senkrecht zu der Ebene, die durch die drei Punkte und das Gelenk gelegt ist, und entfernt also den Ambossstiel vom Hammerstiel.

Bei den bisher beschriebenen Versuchen ist der Steigbügel meist vom Hammer oder vom Trommelfell aus in Bewegung gesetzt worden, wobei, wie wir gesehen haben, die Excursionsweite ein wenig, nämlich auf etwa zwei Drittheile ihrer Grösse verkleinert werden muss. Um die Festigkeit des Mechanismus zu untersuchen, habe ich nun auch den entgegengesetzten Versuch angestellt und die Excursionsweite des Hammers zu messen gesucht, während ich ihn von der Basis des Steigbügels aus bewegte, wobei natürlich nur solche Bewegungen des Hammers in Betracht kommen, bei denen seine Stossfläche fest mit der des Ambosses in Berührung bleibt. Zu dem Ende habe ich an dem früher erwähnten Präparat, welches die in den Vorhof eingesetzte Röhre enthielt, noch am Köpfchen des

Hammers einen Glasfaden von 59 Mm. Länge angekittet, und dann versucht, wie starke Bewegungen ich am Hammer hervorbringen konnte, wenn ich durch das in den Vorhof gesetzte Röhrchen Flüssigkeit in diesen bald eintrieb, bald aussog. Die Excursion betrug an der Spitze des Glasfädchens nur etwa ein halbes Millimeter. Rechnet man die Entfernung von der Drehungsaxe bis zur Befestigungsstelle des Glasfädchens am Hammerkopf zu 4 Mm., so ist die Länge des Hebels 63 Mm. und die oben genannte Excursion von $\frac{1}{2}$ Mm. entspricht einer Drehung von etwa einem halben Grade. Für die Spitze des Hammerstiels, deren Entfernung vom Axenbande $4\frac{1}{2}$ Mm. beträgt, giebt dies dagegen eine Excursion von nur $\frac{1}{28}$ Mm., eine Grösse, die den kleineren oben gefundenen Werthen für die mittleren Excursionen der Steigbügelbasis etwa gleich ist. Wir sollten einen etwas grösseren Werth für die Excursion des Hammerstiels theoretisch erwarten. Bei der verminderten Straffheit der thierischen Gewebe nach dem Tode, und bei dem Mangel der Elasticität, namentlich des Tensor Tympani, dürfen wir aber wohl nicht mehr dieselbe Präcision des Ineinandergreifens der Gehörknöchelchen erwarten, wie sie am lebenden Ohre stattfinden mag. Dadurch kann die Uebertragung der kleinen Bewegungen des Amboss auf den Hammer beeinträchtigt werden[1]).

Insofern aber stimmen diese verschiedenen Messungsversuche überein, als sie erkennen lassen, dass die Verschiebungen des Steigbügels und Hammers, so lange die beiden fest in einander greifen, sich auf Amplituden, die kleiner als ein Zehntel Millimeter sind, beschränken.

Bringt man den Hammer dagegen dadurch in Bewegung, dass man Luft in den äusseren Gehörgang eintreibt, und wieder herauszieht, so zeigt der als Fühlhebel gebrauchte Glasfaden viel grössere Excursionen; seine Spitze bewegt sich dann 5 Mm. hin und her, während sie vom Steigbügel aus sich nur um $\frac{1}{2}$ Mm. verschieben liess.

---

1) Ich bemerke dabei noch, dass auch die Uebertragung der Bewegungen vom Trommelfell auf das Wasser des Vorhofs an dem Tage, wo ich die oben beschriebenen Versuche anstellte, schon merklich beeinträchtigt war. Ich erhielt nur noch 0,4 Mm. Steigung im Vorhofsmanometer, während ich am Tage vorher, wo ich den Vorhof unter der Luftpumpe mit Wasser gefüllt hatte, bis zu 0,9 Mm. Steigung erhielt. Es wäre zu wünschen, dass diese Versuche von einem Anatomen, dem eine reichliche Auswahl passender Präparate zugeht, an möglichst frischen Stücken mehrfach wiederholt würden.

Die Excursion also, welche der Hammer ohne den Amboss machen kann, ist annähernd neunmal so gross, als die er mit ihm zusammen ausführt. Diese Art der Bewegung wird aber nicht auf das Labyrinthwasser übertragen, abgesehen von den jedenfalls kleinen Veränderungen des Druckes, welche die veränderte Spannung der Gelenkbänder oder die Reibung der Gelenkflächen des Hammerambossgelenks aneinander im Labyrinthwasser auch dann vielleicht noch hervorzubringen genügen, wenn die Sperrzähne des Gelenks sich nicht mehr berühren.

Wenn der Lebende Luft in seine Trommelhöhle eintreibt, hört er schwache Töne aus den mittleren und höheren Gegenden der Scala noch fast oder ganz ebenso gut, wie gewöhnlich; dagegen ist es sehr auffallend, dass man dieselben Töne, wenn sie stark angegeben werden, auffallend viel stärker bei Gleichheit des Drucks in der Trommelhöhle hört, als wennn dieser gesteigert ist. Es scheint mir dies darin seine Erklärung zu finden, dass die Gelenkfläche des Hammers und Amboss auch durch die Reibung ein wenig an einander adhäriren und festhaften können, wie sich dies am anatomischen Präparate zeigt, wenn man das Ambosssteigbügelgelenk durchschnitten hat, und nun den Hammer durch Luftverdünnung im Gehörgange nach aussen zieht. Der Amboss geht dann mit ihm nach aussen; dreht man diesen aber mit einer Nadel so, dass sein langer Fortsatz wieder den Steigbügel berührt, so bleibt er, wie oben erwähnt wurde, auch in dieser Lage stehen. Die Reibung kann ihn also auch gegen die Spannung der Bänder oder andre schwache Kräfte in der einmal gegebenen Lage am Hammer festhalten, und dies auch wohl bei schwachen Schallschwingungen thun. Stärkere Kräfte oder Erschütterungen werden aber die beiden Knochen dann doch an einander gleiten machen müssen, und starke Schallschwingungen werden also bei solcher Stellung der Knochen merklich gedämpft übergeleitet werden.

Ich habe für diese Versuche theils das hohe Ticken einer Taschenuhr benutzt, theils Stimmgabeln, welche ich schwach angeschlagen soweit vom Ohr entfernt hielt, dass ich die Schwebungen, welche das Drehen der Gabel um ihre Längsaxe erzeugt, eben noch hören konnte. Man hört sie, wie gesagt, bei aufgeblasenem Trommelfell ebenso gut, wie sonst, wenn sie den obern Octaven der Scala angehören, fast ebenso gut wie sonst, in den mittleren Octaven, merklich schwächer allerdings die tieferen Töne. Dagegen zeigten die

höheren Gabeln, wenn sie stark angeschlagen waren, und vor das Ohr mit aufgeblasenem Trommelfell gehalten wurden, ein sehr merkbares Schwellen des Tons, sowie man durch eine Schlingbewegung das Gleichgewicht der Luft wieder herstellte.

Ich möchte hier noch auf ein anderes Phänomen aufmerksam machen, was, wie ich glaube seine Erklärung aus dem beschriebenen Mechanismus herleitet. Wenn ich nämlich eine stark angeschlagene Stimmgabel, die aus einem zusammenhängenden Stück Stahl besteht, und an der also nichts klirren kann, nahe an das Ohr bringe so dass ich ihren Ton recht kräftig höre, so bekommt seine Klangfarbe etwas scharfes, und ich höre deutlich Klirrtöne, wie man sie an musikalischen Instrumenten hört, in denen etwas lose ist, oder auch an einer Stimmgabel, die man nicht sehr fest auf einen Resonanzboden aufgesetzt hat. Solche Klirrtöne entstehen durch kleine Stösse eines schwingenden Körpers gegen einen ruhenden oder anders schwingenden. Diese Stösse wiederholen sich regelmässig erscheinen also als Klang, aber da sie einer discontinuirlichen periodischen Bewegung entsprechen, als Klang mit sehr vielen hohen Obertönen und sehr scharfer Klangfarbe. Dergleichen Klirrtöne entstehen nun bei starken Klängen offenbar auch im Ohre selber; und an einer *B* Gabel von 116 Schwingungen höre ich das Klirren im Ohre auch deutlich als Geschwirr in getrennten Stössen. Dieses Klirren ist sehr deutlich und stark, wenn der Luftdruck in der Trommelhöhle gleich oder kleiner ist, als in der Atmosphäre und also die Sperrzähne des Hammers und Amboss an einander schliessen, aber es verschwindet, wenn ich Luft in die Trommelhöhle eintreibe und dadurch die genannten Sperrzähne aus einander dränge.

Ich glaube daraus schliessen zu dürfen, dass dies Klirren von den Sperrzähnen herrührt. Bei sehr grossen Excursionen des Trommelfells wird während der nach aussen gerichteten Phase der Schwingung der Amboss nicht hinreichend kräftig nach aussen getrieben oder kann auch endlich wohl überhaupt der Excursion des Hammers nicht mehr vollständig folgen, so dass er ihn loslässt, und bei der nächsten Schwingung nach innen von dem zurückkehrenden Hammer einen Stoss empfängt.

Ich erinnere noch daran, dass dies auch gerade ein zur Erzeugung von Combinationstönen sehr geeigneter Mechanismus ist[1]),

---

1) S. Lehre von den Tonempfindungen S. 233–236.

und möchte namentlich die eigenthümliche Tastempfindung von Schwirren im Ohr, welche man bei den Combinationstönen zweier starker Sopranstimmen hat, wenn sie Terzengänge ausführen, auf dieses Klirren zwischen Hammer und Amboss beziehen.

Auch erscheint dieses Phänomen bedeutungsvoll für das natürliche Harmoniegefühl des Ohres, da hiernach starke Töne, selbst wenn sie ausserhalb des Ohres ohne Obertöne sind, im Ohre selbst harmonische Obertöne entwickeln müssen. Dadurch erlangen die Klänge mit harmonischen Obertönen, die regelmässig periodischen Luftbewegungen entprechen, einen natürlichen Vorzug vor denen mit unharmonischen Obertönen; wie denn überhaupt die ganze Lehre von den Conferenzen durch diesen Umstand unabhängiger wird von den dem äusseren Klange anhaftenden Obertönen.

Klirrtöne können nun auch viel tiefer sein als der erregende Ton, wenn der emporgeworfene Körper erst nach Ablauf mehrerer Schwingungen wieder zurückfällt und einen neuen Stoss erhält. Dieser Art sind, wie ich vermuthe, gewisse tiefe rauhe Geräusche, die ich höre, wenn die schrillen hohen Töne der viergestrichenen Octave für die der Gehörgang resonirt, sehr stark angegeben werden. Dabei kommt wahrscheinlich die Fläche des Trommelfells in ungewöhnlich starke Schwingung, was sich auch durch eine kitzelnd schwirrende Tastempfindung in der Tiefe des Ohres verräth. Zur Hervorbringung solcher Töne ist der unten von Fig. 11 abgebildete Apparat sehr geeignet.

Ich will hier noch erwähnen, dass ich, um die Vollständigkeit und Richtigkeit der hier gegebenen Deutung der mechanischen Einrichtungen des Ohres zu prüfen, mir ein Modell des Trommelhöhlenapparats in vergrössertem Massstabe nachgebaut habe. Die Gehörknöchelchen sind aus Holz geschnitzt, das Trommelfell aus Handschuhleder so geschnitten, dass es längs des Hammerstiels eine am Hammer befestigte Naht erhalten hat. Dadurch kann man seine concav kegelförmige Form herausbringen. Eine Oeffnung von passender Form, in ein Brettchen geschnitten und mit abgeschrägten Rändern, an welche der Rand jenes künstlichen Trommelfells angeleimt ist, repräsentirt das innere Ende des äussern Gehörgangs. Aeusserlich ist an dem Brette ein cylindrischer Blechring befestigt, die genannte Oeffnung umgreifend, auf diesen passt ein Blechdeckel mit Kautschukrand, wie man sie jetzt technisch verfertigt zum luftdichten Verschluss eingemachter Früchte. Setzt man

diesen Deckel auf, so dass noch ein beweglicher Theil des Kautschukrandes zwischen ihm und dem genannten Blechringe bleibt, so kann man auch Verdichtungen der Luft auf der äussern Seite jenes künstlichen Trommelfells hervorbringen, und auf die Gehörknöchelchen wirken lassen.

Innen ist nahe am oberen vorderen Rande der Oeffnung eine Holzleiste mit vorragender Spitze befestigt, welche letztere die Spina tympanica major darstellt. Ein von ihr ausgehender Hanffaden, der den Hammer durchbohrt und umschlingt, dann am hinteren oberen Rande der Oeffnung das Brett durchbohrt und durch eine eiserne Holzschraube, die als Wirbel dient, festgezogen werden kann, stellt das Axenband dar. Andere passend angebrachte, und durch Wirbel zu spannende Fäden die Züge des Ligamentum externum und die von der Spina nach oben ziehenden Züge des Ligamentum anterius Mallei. Endlich ein Seidenfaden, der durch einen an einer kleinen hölzernen Säule befestigten eisernen Ring geht, und dann an einem gespannten Kautschukbande befestigt ist, stellt die Sehne des Trommelfellspanners dar.

Die Gelenkfläche des Hammers und Amboss habe ich so hergestellt, dass ich erst warmes Siegellack auf die Fläche des Hammers auftrug und ihm vor dem völligen Erkalten die entsprechende Form zu geben suchte, so gut dies ging. Dann wurde die Gelenkfläche des Amboss auch mit heissem weichen Siegellack überzogen und auf der mit Stanniol belegten Gelenkfläche des Hammers abgedrückt. Das Stanniol haftet dann am Amboss. Ehe nun das Siegellack ganz kalt wurde, machte ich drehende Bewegungen mit dem Amboss, wie sie an den natürlich verbundenen Knochen vorkommen, um der zweiten Fläche die Fähigkeit zu geben, auf der ersten zu gleiten. Nachdem die Ambossfläche ganz kalt geworden war, diente sie wieder als Form, um auf ihr die erwärmte und auch mit Stanniol belegte Hammerfläche zu formen und gleitbar zu machen. Dies wurde abwechsend mit der einen und andern Fläche wiederholt, bis sie beide hinreichend leicht auf einander glitten. Natürlich musste dabei darauf gesehen werden, dass keine gleitenden Bewegungen ausgeführt wurden, welche die Sperrzähne zerstört hätten. Es gelang mir auf diese Weise, ein gutes Gelenk zu bekommen. Das Kapselband wurde hergestellt durch Schleifen von dünnem elastischem Gummischnur, welche am Amboss festgemacht waren, und über kleine aus abgekniffenen Stecknadeln gemachte

Häkchen am Hammer übergestreift werden konnten, so dass sie die beiden Knochen mit geringem elastischem Druck aneinander hielten.

Das Gelenkband des kurzen Fortsatzes des Amboss bestand nur aus einer Schleife von seidenen Fäden, die durch ein Loch des Amboss ging. Dies Band kann schlaff sein, aber es kommt wesentlich darauf an, dass der Stützpunkt dieser Stelle des Amboss an der äussern Wand der Trommelhöhle nachgebildet sei.

Die Verbindung zwischen dem langen Fortsatze des Amboss und dem Steigbügel kann sich auf einfache Aneinanderlagerung beschränken, oder durch eine Schlinge von seidenen Fäden nachgemacht werden. Zur Leitung der Stösse genügt ersteres.

Das ovale Fenster wurde in ein kleineres Brettchen eingeschnitten, welches durch kleine hölzerne Säulchen dem grösseren Brette parallel festgehalten wurde. Dies Brettchen bestand aus zwei zusammengeschraubten Platten, zwischen welche eine dünne Kautschukplatte eingeklemmt war, die die Membran des ovalen Fensters darstellte. Die Basalplatte des künstlichen Steigbügels war ebenfalls doppelt und mit Zwischenlagerung des mittleren Theils jener Gummiplatte zusammengeschraubt.

Ein solches Modell ist sehr nützlich, theils zur Demonstration, theils um sich schnell die Bedeutung der einzelnen Bänder und Gelenke für die Befestigung der Knöchelchen klar zu machen, da man alle einzelnen Theile aus einander nehmen, die einzelnen Bänder stärker oder schwächer spannen kann.

Uebrigens überträgt dieses Modell mit grosser Präcision kleine Stösse, die entweder aussen unmittelbar gegen den Hammerstiel, oder gegen den äussern luftdichtschliessenden Deckel geführt werden, auf den Steigbügel, wie man theils an diesem fühlen kann, wenn man die Finger über seine Basis und die Platte in der sie festsitzt, hinlegt, theils auch an dem Emporspringen aufgelegter leichter Körper erkennen kann.

Die Durchmesser meines künstlichen Trommelfells sind 80 und 120 Mm. Nach dieser Grösse richtet sich die der übrigen Theile. Alle in der vorigen Beschreibung enthaltenen Angaben über die Beweglichkeit und Befestigungsweise der Theilchen habe ich an diesem Modell geprüft und bestätigt gefunden[1]).

---

1) Copien des Modells werden durch den Gehilfen des hiesigen physiologischen Instituts, Herrn Sittel angefertigt.

§. 7.

Mechanik des Trommelfells.

Das Trommelfell ist als eine gespannte Membran zu betrachten, die aber von den in der Akustik bisher untersuchten und gebrauchten Membranen dadurch wesentlich abweicht, dass sie gekrümmt ist. Seine Spannung ist bedingt durch den Handgriff des Hammers, der es nach innen zieht, und der selbst in dieser Lage durch seine Befestigungsbänder und durch die Elasticität des Trommelfellspanners erhalten wird. Wären die Radialfasern des Trommelfells allein vorhanden und nicht durch Querfasern verbunden, so würden sich dieselben zu geraden Linien strecken. In der That thun sie dies nicht, sondern halten eine gekrümmte, gegen den Gehörgang convexe Form ein, woraus zu schliessen ist, dass sie durch die Ringfasern gegen einander hin gezogen, und dass die letzteren auch mit gespannt werden. In der That ist am ruhenden Trommelfell keine andere Kraft da, welche die Radialfasern in ihrer gekrümmten Form erhalten könnte, ausser der Spannung der Ringfasern.

Bei den Schallerschütterungen wirkt nun der Luftdruck bald gegen die convexe, bald gegen die concave Fläche des Trommelfells, je nachdem er abwechselnd im Gehörgange grösser oder kleiner ist, als in der Trommelhöhle. In jedem Falle wirkt er in einer Richtung, die senkrecht gegen die Fläche der Membran gerichtet ist, also auch senkrecht gegen die Wölbung der Radialfasern, die er bald zu vermindern, bald zu vermehren strebt.

Da die Bögen, welche die Radialfasern des Trommelfells bilden, ziemlich flach sind, so entsteht durch diese Anordnung, wie sogleich nachher gezeigt werden wird, dieselbe mechanische Wirkung, als wenn der Luftdruck am Ende eines sehr langen Hebelarms wirkte, während die Spitze des Hammerstiels das Ende eines sehr kurzen Hebelarms bildete. Eine relativ beträchtliche Verschiebung der Fläche des Trommelfells in Richtung des auf sie wirkenden Luftdrucks bedingt nämlich eine verhältnissmässig kleine Verschiebung der Hammerspitze, und umgekehrt. Daraus folgt denn weiter, nach dem bekannten allgemeinen mechanischen Gesetze der virtuellen Geschwindigkeiten, dass schon ein verhältnissmässig geringer Werth des Luftdrucks einer verhältnissmässig grossen am Hammergriffe angebrachten Kraft das Gleichgewicht halten, beziehlich eine solche ersetzen wird.

Um dies einzusehen kann man sich zunächst auf die Betrachtung einer einzelnen gebogenen Radialfaser beschränken, die man sich durch den Luftdruck zu Kreisbögen von gleichbleibender Länge aber verschiedener Krümmung, also verschiedenem Radius umgeformt denkt. Wenn l die Länge der Faser ist, r der Radius des Kreises, dem der von ihr gebildete Bogen angehört, und λ die Sehne, die zum Bogen l gehört, so ist $\frac{1}{2}\frac{\lambda}{r}$ der Sinus des halben Centriwinkels, der zu dem Bogen l gehört, also

$$l = 2\,r.\ \mathrm{Arc.\ sin}\left(\frac{\lambda}{2\,r}\right)$$

oder

$$\lambda = 2\,r\ \sin\left(\frac{l}{2\,r}\right)$$

und die Differenz zwischen Sehne und Bogen

$$l - \lambda = 2\,r\left\{\frac{l}{2\,r} - \sin\left(\frac{l}{2\,r}\right)\right\}$$

Ist nun der Bogen sehr flach, also r sehr gross gegen l, so können wir den Sinus dieser Formel nach den Potenzen seines Bogens entwickelt denken, und uns auf die ersten beiden Glieder dieser Entwicklung beschränken, da die Glieder schnell sehr klein werden.

$$\sin\left(\frac{l}{2\,r}\right) = \frac{l}{2\,r} - \frac{1}{6}.\left(\frac{l}{2\,r}\right)^3.$$

Dies giebt

$$l - \lambda = \frac{1}{24}\frac{l^3}{r^2}\ \ldots\ldots\ \Big\}\ 1.$$

Die Hervorwölbung des Bogens, oder der Abstand s seiner Mitte von der Mitte der Sehne ist gegeben durch die Gleichung

$$\frac{r - s}{r} = \cos\left(\frac{l}{2\,r}\right)$$

oder

$$s = r\left[1 - \cos\left(\frac{l}{2\,r}\right)\right]$$

Macht man hier ebenfalls die Reihenentwicklung für den Cosinus, so ergiebt dies

$$s = \frac{1}{8}\frac{l^2}{r}\ \ldots\ldots\ \Big\}\ 2$$

oder wenn man r aus 1 und 2 eliminirt

$$l - \lambda = \frac{8}{3}\frac{s^2}{l}$$

Nun ist die links stehende Differenz $l - \lambda$ die Verkürzung der Sehne, welche durch die Hervorwölbung des Bogens entsteht, oder die Grösse, um welche die beiden Enden der Faser hierbei einander genähert werden. Dagegen ist s die Verschiebung der Mitte der Faser. Wenn nun s verschwindend klein ist im Vergleich mit l, der Länge der Faser, so ist die Grösse $l - \lambda$ der letzten Formel entsprechend eine unendlich kleine Grösse zweiter Ordnung verglichen mit s. Umgekehrt ist klar, dass wenn die Faser als unausdehnsam betrachtet werden darf, die sehr kleine Verlängerung der Faser um die Grösse $l - \lambda$ nicht anders geschehen kann, als indem die Faser sich streckt, und also ihre Mitte die verhältnissmässig viel grössere Verschiebung s erleidet.

Was andrerseit die Berechnung der Kraftverhältnisse betrifft, so ergiebt eine bekannte mechanische Formel, dass die Spannung t der Faser, wenn der auf ihrer Längeneinheit lastende Druck p ist, gleich sei

$$t = pr.$$

Die Richtigkeit dieser Formel ist auf elementarem Wege am leichtesten einzusehen, wenn man sich die Faser überall gleich gekrümmt und gleich weit abstehend von ihren gleich gekrümmten Nachbarfasern und in dieser Weise bis zum Halbkreis verlängert denkt. Dann müssen die die beiden Enden der Faser spannenden Kräfte, d. h. $2t$, dem Druck das Gleichgewicht halten, der auf den ganzen Durchmesser des Halbkreises in gleicher Breite, wie sie die Faser hat, ausgeübt wird, das heisst der Grösse $2r.\ p$. Daraus folgt der eben aufgestellten Gleichung entsprechend

$$2t = 2rp.$$

Je grösser also r ist, das heisst je geringer die Krümmung der Faser unter Wirkung des Luftdrucks ist, desto grösser wird die durch den Luftdruck in der Faser hervorgebrachte Spannungsänderung sein.

Diese Spannungsänderungen der Radialfasern des Trommelfells aber sind es, welche die Schallerschütterungen auf den Griff des Hammers übertragen. Dieselben können also bei sehr flach gespannten Radialfasern der Membran sehr beträchtliche Grössen bei verhältnissmässig geringen Aenderungen des Luftdrucks erreichen. Freilich ist selbstverständlich, dass in dem Maasse als die Kraftwirkung gesteigert wird, auch die Excursionen des Hammerstiels, welche unter Einwirkung dieser Kraft zu Stande kommen können,

geringer werden, ganz ähnlich, wie dies bei der Steigerung der Kraftintensität mittels eines Hebels geschieht.

Andrerseits ist auch zu bemerken, dass diese Spannungsänderungen, welche der Luftdruck herbeiführt, immer nur als Vermehrung oder Verminderung der durch die elastischen Befestigungen des Trommelfells und die Elasticität seiner eigenen Ringfasern unterhaltenen Spannung erscheinen können. Eine grosse Steigerung der Spannung durch Luftdruck von innen her kann den Steigbügel nicht übermässig afficiren, weil das Hammer-Amboss-Gelenk dann nachgiebt. Andrerseits kann Luftdruck von aussen her den Hammergriff höchstens so weit nach innen treiben bis die Radialfasern des Trommelfells gerade gestreckt sind. Sollte der Druck noch grösser werden, so würde er sie wieder krümmen, ihre Sehne verkürzen und den Hammerstiel wieder auswärts ziehen, falls die Ringfasern des Trommelfells, was mir unwahrscheinlich erscheint, wirklich so viel nachgeben könnten, ohne zu reissen.

Das Labyrinth bleibt also jedenfalls vor Extremen des Drucks geschützt, während doch die Wirkung kleiner Druckschwankungen durch die geschilderten Verhältnisse ausserordentlich kräftig gemacht werden kann.

Dass die Excursion der in der Mitte zwischen dem Hammerstiel und dem Befestigungsrande gelegenen Theile des Trommelfells beträchtlich grösser ist, als die des Hammerstiels selbst, zeigt sich auch, wenn man nach dem Vorgange von Politzer ein Manometer in den äusseren Gehörgang einführt. Nur fand ich es an den gebrauchten anatomischen Präparaten vortheilhafter, den Gehörgang ganz mit Wasser zu füllen, als die in ihm enthaltene Luft nur durch einen im Manometerröhrchen befindlichen Wassertropfen zu sperren. Ein solcher Tropfen widersteht kleinen verschiebenden Kräften ein wenig, da er mit seinen beiden capillaren Grenzflächen der Glaswand fest adhärirt, und er bewegt sich deshalb oft nicht, wo er sich bewegen sollte. Hat man aber den ganzen Gehörgang mit Wasser gefüllt, und setzt dann das in einem passenden Stopfen aus Siegellack befestigte Manometerröhrchen ein, so dass sich dabei etwas Wasser in dieses hineindrängt, so zeigt dessen Oberfläche sehr genau die Verschiebungen des Trommelfells an. An demselben Präparate war, wie schon oben beschrieben ist, ein Röhrchen in den Vorhof des Labyrinths eingesetzt, und indem man die Flüssigkeit in dieses hineindrängte oder heraussog, konnte man Steigbügel und

Hammer bewegen. Es ist schon oben angeführt worden, dass die Spitze des Hammerstiels sich dabei nur um $^1/_{28}$ Millimeter hin und her bewegte. Die Flüssigkeit dagegen im Manometerrohr bewegte sich ein Millimeter hin und her. Der innere Durchmesser des Röhrchens wurde durch Calibrirung mit Quecksilber gefunden zu 1,37 Millimeter, die Durchmesser des Trommelfells waren $7^1/_2$ und 9 Millimeter. Daraus berechnet sich eine mittlere Verschiebung des Trommelfells von etwas mehr als $^1/_9$ Millimeter, also dreimal so gross, als die gleichzeitige Bewegung der Spitze des Hammerstiels. Da nun auch der äussere Rand des Trommelfells festsitzt, so folgt, dass die mittleren freien Theile der Membran sich verhältnissmässig sehr viel bedeutender verschoben haben müssen, als die angegebene mittlere Verschiebung betrug, und also jedenfalls mehr als dreimal stärker als die Spitze des Hammerstiels.

In der bisher angestellten elementaren Betrachtung dieses Mechanismus ist darauf keine Rücksicht genommen, dass die betreffenden Meridianbogen des Trommelfells unter einander zusammenhängen, dass ihr gegenseitiger Abstand sich gegen den festgehefteten Rand der Membran hin vergrössert, dass sie durch die Ringfasern mit einander verbunden sind, und sich nicht bewegen können, ohne diese zu dehnen; ja dass nicht einmal die gewölbte natürliche Form des Trommelfells bestehen kann, ohne dass jeder Zug der den Hammerstiel nach innen drängt, auch die Ringfasern spannt und dehnt. Bei der verhältnissmässig unregelmässigen Form des Trommelfells lässt sich nun eine vollständige Analyse der mechanischen Wirkung dieser Verhältnisse nicht geben. Dazu müsste auch erst die Spannung und der Elasticitätsmodul der Ringfasern bekannt sein. Aber man kann allerdings sich ein den wirklichen Verhältnissen etwas besser entsprechendes mathematisches Abbild machen, wenn man sich statt des wirklichen ein ideales Trommelfell denkt, welches in seiner Mitte kegelförmig eingezogen ist, übrigens aber kreisrund und rings um die Mitte symmetrisch gestaltet ist, also eine Rotationsfläche bildet. Die nach den Meridianen einer solchen Fläche verlaufenden Radialfasern kann man als unausdehnsam betrachten; ihre Circularfasern aber müssen einen gewissen Grad von Elasticität haben, um immer gespannt zu bleiben. Was theoretisch über die mechanischen Wirkungen und die vortheilhafteste Gestalt einer solchen Membran zu folgern ist, habe ich in dem mathematischen Anhange entwickelt. Hier wird es genügen daraus folgendes zu bemerken.

Die stärkste Wirkung bei schwacher Wölbung der Membran wird der Luftdruck in dem Falle hervorbringen, wo die Membran schon durch ihre eigene Elasticität die Form angenommen hat, welche ihr auch der Luftdruck zu geben strebt. Es ist das diejenige Form, wo sie bei unveränderter Länge der Radialfasern und unveränderter Stellung ihres Centrum das Volum auf ihrer concaven Seite, d. h. das Volum der Trommelhöhle, zu einem Maximum, das auf ihrer convexen Seite zu einem Minimum macht. Hätte die Membran nämlich nicht von Anfang an eine solche Form, so müsste der Luftdruck sie erst durch veränderte Dehnung ihrer Ringfasern in eine solche überführen, ehe er seine ganze Kraft auf ihr Centrum entfalten könnte.

Die hier verlangte Form einer drehrunden Membran lässt sich berechnen; ein Querschnitt einer solchen, wie er den Verhältnissen des Trommelfells etwa angepasst ist, ist in Fig. 10 construirt. Man

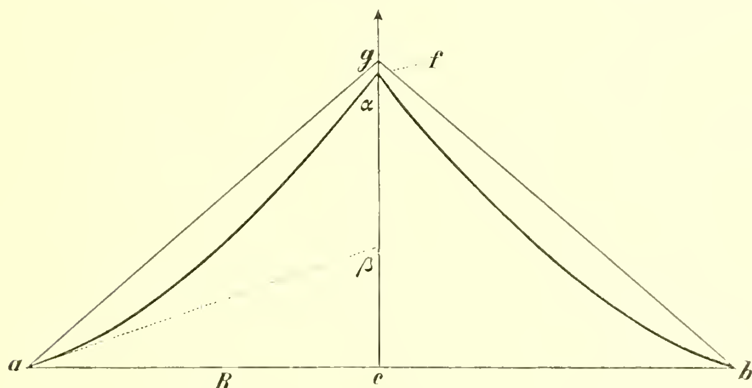


Fig. 10.

sieht, dass diese Form mit der des unteren relativ freieren Theils des Trommelfells gut übereinstimmt.

Wenn wir mit α den Winkel bezeichnen, den die in der Meridianebene (Ebene der Zeichnung) gezogene Tangente der Membran an ihrer Spitze mit der Axe macht, mit β denjenigen, den die entsprechende Tangente eines Randpunktes der Membran mit der Axe macht, mit R den Radius des Randkreises, mit p den Luftdruck, so ist die Kraft k, welche an dem Centrum der Membran angebracht werden muss, um dem Luftdruck das Gleichgewicht zu halten:

$$k = \frac{p\pi R^2 \cos\alpha}{\cos\alpha - \cos\beta}.$$

In dieser Gleichung tritt wieder hervor, dass je kleiner der Unterschied der beiden Winkel α und β ist, das heisst je flacher gespannt die Radialfasern der Membran liegen, die Kraft desto grösser wird. Ferner wächst die Kraft wie $\cos\alpha$, wenn die Winkel α und β bei gleichbleibender Differenz $\cos\alpha - \cos\beta$ kleiner werden, das heisst wenn die Spitze der Membran stärker eingezogen ist.

Bisher sind die akustischen Wirkungen solcher gekrümmter Membranen noch nicht praktisch untersucht worden; höchstens wäre zu bemerken, dass ich ein gekrümmtes Stück Leder als Resonanzboden an einem arabischen Streichinstrument, welches in dem Tunesischen Kaffee der letzten Industrieausstellung in Paris gespielt wurde, angewendet gesehen habe. Man kann sich eine dem Trommelfell ähnlich geformte Membran bilden, wenn man ein nasses Stück Schweinsblase über die Oeffnung eines Glascylinders ausspannt, dann den Cylinder aufrecht stellt, so dass die Blase sich am obern Ende befindet, und nun auf deren Mitte einen mit Metallstücken belasteten Stab senkrecht aufstellt, so dass seine untere Spitze die Mitte der feuchten Blase stark nach unten drängt. In dieser Stellung lässt man die Blase trocknen. Sie erhält dann dauernd eine ähnliche Form wie das Trommelfell mit eingezogenem Nabel und nach aussen convex gekrümmten Meridianlinien.

Um nun die akustische Wirkung einer solchen Membran unter ähnlichen Verhältnissen, wie sie das Trommelfell darbietet, zu prüfen, habe ich den Cylinder, der 44 Mm. inneren Durchmesser hatte, auf ein starkes hölzernes Brett A Fig. 11 befestigt. In der Figur

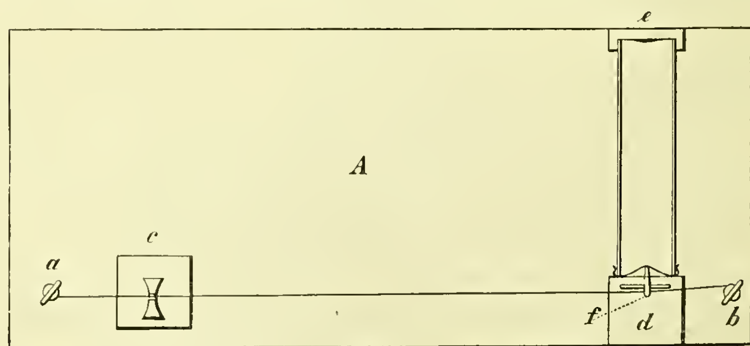


Fig. 11.

liegt er zwischen *e* und *f*, und ist halb durchschnitten dargestellt worden. Er wurde mit Schnüren am Brette befestigt, nachdem sein offenes Ende bei *e* durch ein passend ausgeschnittenes Stück Holz unterstützt war, welches ihn zugleich hinderte gegen *e* hin zu gleiten. Auf die eingezogene Mitte der Membran wurde ein kleines Stäbchen *f* aus leichtem Holz gestützt, und dieses diente als Steg für eine Saite, die durch zwei Wirbel bei *a* und *b* gespannt werden kann. Bei *c* läuft die Saite über einen Steg, der auf die Mitte eines schweren Bleiklotzes aufgesetzt ist, und das andre Ende der schwingenden Saite abgrenzt. Ein zweiter Bleiklotz liegt bei *d*, und zwischen ihn und das Stäbchen *f* ist der Saite parallel ein dünnes Brettchen wie ein Steg einer Violine eingeschoben, welches das Stäbchen von unten her unterstützt, aber den von der Saite gegebenen Stössen, welche das Stäbchen *f* in Richtung seiner Länge durchlaufen, kein Hinderniss entgegensetzt.

Die Bleiklötze dienen dazu, die Ueberleitung der Saitenschwingungen an das Brett *A* und durch dieses an die Luft zu schwächen, so dass der Schall der Saite nur in sehr gedämpfter Weise hörbar wird, sobald man das Stäbchen *f* von der gekrümmten Membran abhebt, oder die Saite nahe bei *f* zwischen diesem Punkte und *c* mit den Fingern festhält, während man sie mit dem Violinbogen anstreicht. Sobald aber die Schwingungen der Saite durch das Stäbchen auf die gekrümmte Membran übertragen werden können, giebt diese trotz ihrer Kleinheit eine mächtige Resonanz, fast der einer Violine ähnlich. Man kann die Saite leicht verkürzen, indem man sie zwischen zwei Fingerspitzen der linken Hand einklemmt, während man mit der rechten den Bogen führt und zwar ihn am besten nahe bei den Fingern der linken Hand aufsetzt. Es zeigt sich dann, dass die starke Resonanz sich über einen sehr grossen Theil der Scala erstreckt, und namentlich für die hohen Töne in der Mitte der viergestrichenen Octav so mächtig wird, dass diese kaum zu ertragen sind.

Der Vorgang ist hierbei in so fern dem am Trommelfell ähnlich, als die gekrümmte Membran die Leitung der Schwingungen herstellt zwischen der Luft und einem festen Körper von mässigem Gewicht, und relativ geringer Schwingungsamplitude, wie es einenfalls das Labyrinthwasser, andernfalls die Enden der Saite sind. Ist die Ueberleitung des Schalls aber leicht von der Saite zur Luft, so muss auch umgekehrt die Leitung des Schalls von der Luft zur

Saite leicht von Statten gehen, nach einem für die Schallbewegungen in vollkommen elastischen Körpern allgemeinen Reciprocitätsgesetze[1]).

Man kann sich davon an dem beschriebenen Apparate übrigens auch leicht durch den Versuch überzeugen. Setzt man leichte Reiterchen von Papier oder dünnen Holzfäserchen auf die Saite und singt deren Ton vor der Mündung der Röhre, so fangen die Papierschnitzelchen an zu tanzen, wie auf den mit einem ausgedehnten Resonanzboden versehenen Saiten der Violine oder des Pianoforte. Ebenso bringt der Ton einer Stimmgabel, die auf einem Resonanzkasten steht, und mit der man die Saite in Einklang gebracht hat, diese sehr leicht zum Mittönen, und die Reiterchen zum Tanzen, selbst aus der Entfernung einiger Fusse.

Dabei hat aber auch die Stimmung der Glasröhre Einfluss, gerade wie es an dem mit einem Resonator bewaffneten Ohre der Fall ist. Giebt man der Saite eine solche Länge, dass ihr Grundton mit dem Eigenton der Röhre übereinstimmt, so kommt der Ton der Saite besonders voll und kräftig zum Vorschein.

§. 8.

Mathematischer Anhang, die Mechanik gekrümmter Membranen betreffend.

Wir setzen im Folgenden voraus eine Membran von drehrunder Gestalt mit unausdehnsamen Meridianlinien. Ausserdem seien elastisch gespannte Ringfasern vorhanden und es wirke der Luftdruck p auf eine ihrer Flächen; auf ihr Centrum dagegen eine in Richtung ihrer Symmetrieaxe gerichtete Kraft q.

Um zunächst einzusehen, wie im vorigen Paragraphen erörtert wurde, dass bei schwach gewölbter Membran der Luftdruck die stärkste Resultante im Centrum der Membran hervorbringt, wenn die Membran durch die Einwirkung ihrer elastischen Ringfasern eine solche Form angenommen hat, wie sie der Luftdruck der Membran bei mangelnder elastischer Spannung der Ringfasern geben würde, stelle man folgende Ueberlegungen an.

Es sei in Fig. 10 S. 51 ab ein Durchmesser, c der Mittelpunkt des befestigten Randes der Membran, und f ihr Centrum, welches durch

1) Für Luftmassen mit festen Wänden ist dasselbe ausgesprochen und erwiesen in meinem Aufsatze: „Theorie der Luftschwingungen in Röhren mit offenen Enden“ im Journal für reine und angewandte Mathematik Bd. LVII. S. 29. Gleichung 9a.

die Kraft fg in Richtung der Axe fortgezogen werde. Die Membran möge unter Einfluss der Spannung ihrer elastischen Ringfasern allein die durch die krummen Linien angezeigte Form angenommen haben und sich in dieser in stabilem Gleichgewicht befinden. Setzen wir zunächst voraus, es sei kein Unterschied des Luftdrucks an ihren beiden Seiten vorhanden.

Nun ist es bekanntlich ein allgemeines mechanisches Gesetz, dass in allen Fällen, wo das Gesetz von der Erhaltung der Kraft seine Anwendung findet, stabiles Gleichgewicht nur dann eintritt, wenn unter allen benachbarten Lagen, in die das bewegliche System continuirlich übergehen kann, die Gleichgewichtslage diejenige ist, in der die von den es angreifenden inneren und äusseren Kräften geleistete Arbeit ein Maximum ist.

Es ist dieses Gesetz auch auf unsere Membran anwendbar, und folgt daraus, dass in ihrer Gleichgewichtslage die Summe der durch die Zusammenziehung ihrer elastischen Ringfasern geleisteten Arbeit ein Maximum sein müsse, verglichen mit allen anderen Formen, in welche die Membran bei unveränderter Stellung des Punktes f continuirlich übergehen könnte.

Soll also irgend eine andre Kraft die Membran bei unveränderter Lage des Punktes h in eine andre Form überführen, so muss dieselbe dabei positive Arbeit leisten, da die Quantität der Spannkräfte der Membran bei diesem Uebergang vergrössert werden muss.

Dasselbe gilt nun auch, wenn die Membran in die Lage afb nicht durch ihre elastischen Kräfte, sondern durch den Druck, oberhalb derselben befindlicher dichterer Luft gebracht würde und auf ihr Centrum f eine Kraft fg wirkt. In diesem Falle müsste die Membran eine solche Form annehmen, dass die durch Ausdehnung der dichteren oberen Luft geleistete Arbeit ein Maximum wäre. Letzteres würde aber der Fall sein, wenn das Volumen der oberhalb der Membran und der verlängerten Ebene ab enthaltenen Luft ein Maximum würde.

Daraus folgt wieder, dass, wenn eine andere Kraft angewendet würde, um die Gestalt der Membran irgend wie zu ändern, dabei das Volumen der oberen dichteren Luft abnehmen, und also von der hinzugebrachten Kraft positive Arbeit geleistet werden müsste.

Wenn nun die Form afb, welche durch die elastischen Kräfte hervorgebracht wird, genau dieselbe ist, wie die, welche der Luftdruck hervorbringt, und erstere der Kraft g, letztere der Kraft γ

das Gleichgewicht hält, so wird die Membran auch in derselben Form unter der gleichzeitigen Wirkung der elastischen Ringfasern und des Luftdrucks im Gleichgewicht sein, und der Kraft $g+\gamma$, die am Punkte f angreift, das Gleichgewicht halten.

Wenn aber die Gleichgewichtsstellung mit dem Centrum der Membran in f für die elastischen Kräfte abweicht von der mit gleicher Lage des Centrum, welche der Luftdruck hervorbringt, so wird die Membran unter dem gemeinsamen Einfluss beider Kräfte in einer von beiden abweichenden Lage zur Ruhe kommen müssen. In dieser werden aber weder die elastischen Kräfte noch der Luftdruck das Maximum ihrer Arbeit geleistet haben, was sie bei der betreffenden Stellung des Centrums der Membran in f leisten können.

Geht man also von derjenigen Form der Membran aus, welche sie erhält, wenn die Kraft g unendlich gross ist, und wo ihre Radialfasern sich gerade strecken müssen, und vermindert alsdann allmälig die Kraft g, bis das Centrum der Membran in den Punkt f gerückt ist, so leistet die Membran dabei eine Arbeit, die vom Werthe Null bis zu einem Werthe G steigt, und deren Werth abhängig ist von der Lage des Punktes f. Es sei G_0 diese Arbeit, wenn die Elasticität allein wirksam ist, G_1 wenn der Luftdruck allein wirksam ist, und G_2 dieselbe, wenn beide Kräfte gleichzeitig wirken. Es ist also jedenfalls $G_2 < G_0 + G_1$, ausgenommen den Fall, wo Elasticität und Luftdruck der Membran dieselbe Form geben.

Geht man also von der Anfangslage aus, wo diese Grössen gleich Null sind, so muss jedenfalls, wenn man die Länge gf mit h bezeichnet, während einer ersten Periode auch

$$\frac{dG_2}{dh} < \frac{dG_0}{dh} + \frac{dG_1}{dh}$$

sein, weil sonst von Anfang an

$$G_2 \geqq G_0 + G_1$$

sein müsste. Nun sind aber die obigen Differentialquotienten gleich den resultirenden Kräften, mit welchen die Membran ihr Centrum gegen c hin zu ziehen strebt.

Es ist nämlich die Kraft g, mit der die Elasticität der Membran allein gewonnen wirkt:

$$g = \frac{dG_0}{dh}.$$

Die Kraft g, mit der der Luftdruck allein genommen wirkt

$$\gamma = \frac{dG_1}{dh},$$

und die Kraft, mit welcher Luftdruck und Elasticität zugleich wirken, welche wir mit $g+\gamma_0$ bezeichnen wollen:

$$g+\gamma_0 = \frac{dG_2}{dh}.$$

Aus obiger Gleichung folgt, dass bei den kleineren Wölbungen der Membran sei

$$g+\gamma_0 < g+\gamma,$$

oder

$$\gamma_0 < \gamma,$$

wenn nicht die Gleichgewichtsform für Elasticität und Luftdruck dieselbe ist; was zu beweisen war.

Bestimmung der Form einer durch den Luftdruck allein gespannten Membran, mit unausdehnsamen Radialfasern.

Es sei z eine auf der Axe der Membran abgemessene Strecke, und r der Radius des Kreises, in dem eine durch den einen veränderlichen Endpunkt von z senkrecht zur Axe gelegte Ebene die Membran schneidet. Das Volumen, welches zwischen zwei solchen Ebenen liegt, die den unendlich wenig verschiedenen Werthen z und $z+dz$ entsprechen, ist alsdann

$$\pi r^2 dz.$$

Das ganze Volumen V zwischen der Membran und der Ebene ihres Anheftungskreises ist demnach

$$v = \int_o^a \pi r^2 \, dz$$

wenn für das Centrum der Membran $z = o$ und für ihren Rand $z = a$ ist.

Bezeichnen wir den Ueberschuss des Luftdrucks auf der oberen Seite der Membran über den auf der untern mit p, und mit G die von einer an das Centrum der Membran angreifenden der Axe parallelen Kraft geleistete Arbeit, so ist die von dieser Kraft und dem Luftdruck geleistete Arbeit gleich

$$G - pv.$$

Die Bedingung des Gleichgewichts ist, dass diese Grösse ein Maximum sei, während die Länge der Radialfasern unverändert bleibt, deren Längenelement ds durch die bekannte Gleichung gegeben ist

$$ds^2 = dr^2 + dz^2.$$

Nehmen wir r als unabhängige Variable, so muss also sein

$$G - p\pi \int_0^R r^2 \frac{dz}{dr} dr = \text{Max.}$$

oder nach den Grundsätzen der Variationsrechnung, wenn wir z variiren:

$$\frac{dG}{dz}\delta z - \pi p \int_0^R \left(r^2 \frac{d\delta z}{dr} - \frac{\lambda \frac{dz}{dr} \frac{d\delta z}{dr}}{\sqrt{1+\left(\frac{dz}{dr}\right)^2}} \right) dr = 0.$$

Partiell integrirt giebt dies, wenn wir δz am Rande der Membran gleich Null setzen, und in ihrem Centrum gleich δz_0

$$-\left\{ \frac{dG}{dz} + \pi p \lambda \frac{\frac{dz}{dr}}{\sqrt{1+\left(\frac{dz}{dr}\right)^2}} \right\} \delta z_0$$

$$+ \pi p \int \delta z \frac{d}{dr}\left(r^2 - \lambda \frac{\frac{dz}{dr}}{\sqrt{1+\left(\frac{dz}{dr}\right)^2}} \right) dr = 0 .$$

Daraus folgt, da δz_0 und δz von einander unabhängige willkürliche Grössen sind, dass die mit ihnen multiplicirten Grössen gleich Null sind; also 1) für den Mittelpunkt der Membran

$$\frac{dG}{dz} + \pi p \lambda \frac{\frac{dz}{dr}}{\sqrt{1+\left(\frac{dz}{dr}\right)^2}} = 0$$

2) für ihre Fläche

$$r^2 - \lambda \frac{\frac{dz}{dr}}{\sqrt{1+\left(\frac{dz}{dr}\right)^2}} = C,$$

wo unter C eine Constante verstanden ist.

Im Mittelpunkte der Membran wird $r = o$, und $\frac{dz}{dr} = \text{cotg. } \alpha$, worin α den in Fig. 10 so genannten Winkel bezeichnet; daher reducirt sich für diesen Punkt die Gleichung 2 auf

$$C = -\lambda \cos \alpha$$

und die Gleichung 1 giebt für denselben Punkt

$$\frac{dG}{dz} + \pi p \lambda \cos \alpha = o.$$

Wenn wir dagegen am Rande der Membran den Werth von r mit R bezeichnen, und eben dort $\frac{dz}{dr} = \tang \beta$ setzen, wie in Figur 10, so ist dort nach Gleichung 2

$$R^2 - \lambda \cos \beta = C = -\lambda \cos \alpha$$

also

$$R^2 = \lambda (\cos \beta - \cos \alpha)$$

und die Kraft g

$$g = \frac{dG}{dz} = -\frac{\pi p R^2 \cos \alpha}{\cos \beta - \cos \alpha}$$

wie im vorigen Paragraphen angegeben ist.

Aus Gleichung 2 folgt weiter

$$(r^2 + \lambda \cos \alpha)^2 \left[1 + \left(\frac{dz}{dr}\right)^2\right] = \lambda^2 \left(\frac{dz}{dr}\right)^2$$

oder

$$\frac{r^2 + \lambda \cos \alpha}{\sqrt{\lambda^2 - (r^2 + \lambda \cos \alpha)^2}} = \frac{dz}{dr}$$

Dies ist ein eliptisches Integral, welches wir auf die normale Form bringen, wenn wir setzen

$$r = \sqrt{2 \lambda \sin \frac{\alpha}{2}} \cdot \cos \omega$$

$$dr = -\sqrt{2 \lambda \sin \frac{\alpha}{2}} \cdot \sin \omega \, d\omega$$

so wird

$$dz = -\sqrt{\frac{\lambda}{2}} \frac{1 - 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \sin^2 \omega}{\sqrt{1 - \sin^2 \frac{\alpha}{2} \sin^2 \omega}} d\omega$$

Oder indem wir Legendre's Bezeichnung brauchen

$$F_\omega = \int_o^\omega \frac{d\omega}{\sqrt{1 - \varkappa^2 \sin^2 \omega}}$$

$$E_\omega = \int_o^\omega \sqrt{1 - \varkappa^2 \sin^2 \omega} \, d\omega$$

und setzen

$$\varkappa^2 = \sin^2 \frac{\alpha}{2}$$

so ist

$$z = \sqrt{\frac{\lambda}{2}} \left\{ 2\, E\omega - F\omega \right\} + \text{Const.}$$

$$r = 2 \sqrt{\frac{\lambda}{2}} \cdot \varkappa \cos \omega$$

Gleichzeitig ergiebt sich auch leicht die Länge des Bogens der Radialfasern

$$s = \sqrt{\frac{\lambda}{2}}\, F\omega$$

Mittels der Tafeln von Legendre, welche die Werthe von $E\omega$ und $F\omega$ geben für alle Werthe von $\frac{\alpha}{2}$ und ω, die ganzen Winkelgraden entsprechen, kann man die Form dieser Curven am leichtesten construiren. Uebrigens lassen sich die Werthe der $E\omega$ und $F\omega$ auch nach bekannten Methoden für beliebige Werthe der α und ω berechnen.

Die Figur 12 zeigt eine vollständig von einem zum andern Axenpunkte ausgezogene Curve dieser Art, bei welcher dem Winkel α, der Form des Trommelfells entsprechend, der Werth $180^0 - 40^0 = 140^0$ gegeben ist. Es möge der Axenpunkt a das Centrum der Membran repräsentiren. Jeder Punkt der von a auslaufenden Zweige der Curve könnte dem Rande der Membran entsprechen, bis zu demjenigen hin, wo die Curve nach b herabsteigend, sich selbst wieder schneidet. Das Trommelfell selbst entspricht nur einem kleinen Theile dieser Curve.

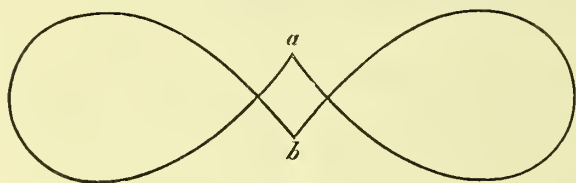


Fig. 12.

Ich verschiebe einstweilen noch die speciellere Beschreibung und Besprechung der in meinem oben citirten Vortrage vom 9. August 1867 erwähnten Versuche über Resonanztöne des lebenden Ohres, weil ich noch bessere Mittel zur Hervorbringung tiefer einfacher Töne mir zu verschaffen hoffe, als ich sie bisher hatte, und damit die Versuche besser auszuführen sein werden.



